

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und
Kieferheilkunde

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger
des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung
zur Aufbereitungsqualität von Wurzelkanälen
nach Instrumentierung mit reziproken und
vollrotierenden Wurzelkanalinstrumenten

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Anna Elisabeth Dahlhoff

aus Münster

Marburg, 2013

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

am: 6.12.2013

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekan: Prof. Dr. H. Schäfer

Referent: Prof. Dr. R. Frankenberger

Korreferent: Prof. Dr. N. Arweiler

Meinem Vater

Heinrich Gerhard Dahlhoff

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Methodik der Literaturrecherche	3
2.2	Wurzelkanalaufbereitung	5
2.2.1	Anatomische Besonderheiten	5
2.2.2	Herausforderungen und Komplikationen bei der Wurzelkanalbehandlung	7
2.2.3	Instrumente zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung	8
2.3	Spülflüssigkeiten und Smear layer	16
2.3.1	Bedeutung der Wurzelkanalspülung für die Endodontie	16
2.3.2	Natriumhypochlorit	17
2.3.3	Smear layer	18
2.3.4	EDTA	19
2.3.5	Wechselwirkungen von NaOCl und EDTA	20
3	Zielsetzung der Arbeit	21
4	Material und Methode	22
4.1	Versuchsaufbau	23
4.1.1	Verwendete Geräte und Instrumente	29
4.1.2	Verwendete Spülflüssigkeiten	37
4.1.3	Digitales Röntgensystem	37
4.1.4	Rasterelektronenmikroskop	39
5	Ergebnisse	41
5.1	Varianzanalyse und Gleichheit der Mittelwerte	42
5.2	Ergebnisse der Aufbereitungsdauer	42
5.3	Ergebnisse der Spülzeit	43
5.4	Ergebnisse zur Trocknungszeit	44
5.5	Ergebnisse zur Gesamtaufbereitungszeit	45
5.6	Ergebnisse zu der Differenz der Krümmungswinkel der Wurzelkanäle vor und nach der Aufbereitung (computergestützte Auswertung)	46
5.7	Ergebnisse zum Debris	47
5.8	Ergebnisse zum Smear layer	48
5.9	Ergebnisse zur Kanalwandbeschaffenheit	49
6	Diskussion	50
6.1	Standardisierung und Vergleichbarkeit der Methodik	50

6.2 Bewertung der Ergebnisse	51
6.3 Abschlussbewertung	58
7 Zusammenfassung	60
8 Summary	62
9 Anhang	63
10 Literaturverzeichnis	70
11 Tabellarischer Lebenslauf	77
12 Verzeichnis meiner akademischen Lehrer	78
13 Danksagung	79
14 Ehrenwörtliche Erklärung	80

1 Einleitung und Problemstellung

Die Bestrebungen einer Wurzelkanalbehandlung zielen auf den dauerhaften Erhalt des Zahnes ab. Um diesen zu verwirklichen, sind drei grundlegende Kriterien bei der Behandlung des erkrankten Zahnes zu berücksichtigen:

- die Reduktion bzw. Eliminierung von Mikroorganismen in dem Wurzelkanalsystem
- die mechanische Entfernung erkrankten Gewebes und erkrankter Hartschubstanz aus dem Wurzelkanal
- der abschließende bakteriendichte Verschluss des Zahnes.

Zur chemischen Reinigung haben sich Spülflüssigkeiten wie Chlorhexidingluconat, Natriumhypochlorit und Ethylendiamintetraacetat, welche unterschiedliche Wirkungsspektren abdecken, als wirkungsvoll erwiesen. Diese werden in unterschiedlichen Konzentrationen mittels entsprechender endodontischer Spülkanülen direkt in den Wurzelkanal appliziert und erzielen dort eine umfassende Desinfektion. Die mechanische Bearbeitung der Wurzelkanalwand erfolgt durch Handinstrumente oder maschinelle Aufbereitungssysteme mit unterschiedlichen Antriebsarten. Der Wurzelkanal wird entsprechend der Konizität der verwendeten Instrumente erweitert und die Kanalwand mit permanent rotierenden oder reziproken Bewegungen abgetragen.

Eine alleinige mechanische oder chemische Reinigung des Kanalsystems führt jedoch nicht zu dem gewünschten langfristigen Erhalt des Zahnes, sondern nur die Kombination beider Reinigungsvarianten, also die chemomechanische Wurzelkanalaufbereitung, kann als nachhaltige Methode angesehen werden, um den Zahn auf die Aufnahme der Wurzelfüllung vorzubereiten.

Im Hinblick auf die maschinellen Aufbereitungssysteme zielen die Bestrebungen der Weiterentwicklung auf eine Reduktion der zu verwendenden Feilenanzahl ab, um dem Behandler eine Zeitersparnis gegenüber konventionellen Aufbereitungssystemen zu ermöglichen und die Wurzelkanalbehandlung somit ökonomischer zu gestalten.

Diesbezüglich stellt sich nun die Frage, ob die durch die Verringerung der Anzahl an verwendeten maschinellen Aufbereitungsinstrumenten erzielte Zeitersparnis zu Lasten der Qualität der Reinigung des Kanalsystems geht.

Im Folgenden soll gezeigt werden, inwiefern sich die Wurzelkanalanatomie anhand der verschiedenen Aufbereitungsmöglichkeiten verändert. Weiterhin ist eine Analyse des Umfangs der Zeitersparnis im Rahmen der gesamten Wurzelkanalbehandlung zu verfolgen, um darzustellen, ob ein reeller Nutzen erzielt werden kann.

Die vorliegende Arbeit zieht einen Vergleich zwischen vier maschinellen Aufbereitungssystemen reziproken und vollrotierenden Antriebs in Hinsicht auf die Beschaffenheit und Säuberung der Wurzelkanalwand in gekrümmten Wurzelkanälen. Hierbei werden konventionelle vollrotierende Systeme solchen Aufbereitungssystemen, welche auf eine Feile zur Bearbeitung eines Kanals reduziert sind, gegenübergestellt.

2 Literaturübersicht

2.1 Methodik der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche erfolgte mit Hilfe des Internets über verschiedene Datenbanken. Dabei wurde zum einen das *HEBIS* Portal der Universität Marburg www.portal.hebis.de und das *OPAC*-System der Universität Marburg www.opac.ub.uni-marburg.de genutzt.

Weiterhin wurde anhand der Schlagwortsuche in der Literaturdatenbank Pubmed www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/ nach relevanten Artikeln gesucht. Hierbei wurden die unten genannten Schlagwörter verwendet. Zunächst wurden die Abstracts der angezeigten Artikel bezüglich ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit geprüft. Daraufhin wurden die entsprechenden Volltexte über den VPN-Client der Universität Marburg bezogen.

Zusätzlich erfolgte die Literaturrecherche mittels Schlagwortsuche über die Wiley Online Library www.onlinelibrary.wiley.com/, welche direkt zu den Publikationen der *Association for Dental Traumatology* und den *Endodontic Topics* führte.

Außerdem wurden ebenfalls Artikel dieser Zeitschriften berücksichtigt, welche durch Schlagwortsuche ermittelt wurden:

- *Journal of Endodontics* www.jendodn.com
- *International Endodontic Journal* www.e-s-e.eu/iej/index.html
- *American Dental Journal* www.jada.ada.org
- *British Dental Journal* www.nature.com/bdj/
- *Journal of Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics* www.ooooe.net .

Verwendete Schlagwörter

- Debris
- Torque
- Anatomic Characteristics
- Smear layer
- Design Features
- EDTA
- ProTaper

- Rotational Speed
- *NaOCl*
- *WaveOne*
- Bending Properties
- *Reciproc*
- Irrigation fluid/liquid
- *SafeSider*
- *NiTi* Alloys

2.2 Wurzelkanalaufbereitung

2.2.1 Anatomische Besonderheiten

Die anatomische Struktur eines Wurzelkanals stellt sich zumeist als ein komplexes System von kleineren Seitenkanälchen dar, welche sich von einem Hauptkanal aus in die Peripherie verzweigen. Sie ziehen zum einen zur Wurzelhaut, zum anderen aber auch zum Dentin und Zement, wo sie blind enden (Meyer 1959).

Das Endodont stellt daher ein offenes System dar, welches über die Foraminae und Seitenkanälchen mit der Mundhöhle und dem Parodont in Verbindung steht. Eine Instrumentierung dieses Systems ist jedoch nur an den Wänden der Hauptkanäle möglich, da die feinen und engen Seitenkanäle nicht zugänglich sind (Hülsmann & Schäfer 2007).

Die Konfigurationsmöglichkeiten der Hauptkanäle sind in acht Hauptgruppen klassifiziert:

- Typ 1: Ein Kanal zieht ausgehend von der Pulpenkammer zum Apex.
- Typ 2: Zwei separate Kanäle verlassen die Pulpenkammer, verbinden sich aber kurz vor dem Apex zu einem Kanal.
- Typ 3: Ein Kanal verlässt die Pulpenkammer, teilt sich im Verlauf des Kanals in zwei Kanäle auf, aber diese Kanäle vereinigen sich kurz vor dem Foramen wieder, wo sie als einzelner Kanal enden.
- Typ 4: Zwei separate Kanäle verlaufen von der Pulpenkammer bis zum Apex.
- Typ 5: Ein Kanal verlässt die Pulpenkammer und teilt sich kurz vor dem Apex in zwei Kanäle mit getrennten Foraminae auf.
- Typ 6: Zwei separate Kanäle verlassen die Pulpenkammer, vereinigen sich im Kanalverlauf, teilen sich kurz vor dem Apex aber wieder in zwei separate Kanäle mit getrennten Foraminae auf.
- Typ 7: Ein Kanal verlässt die Pulpenkammer, teilt und vereinigt sich zunächst wieder zu einem Kanal im Kanalverlauf

und teilt sich kurz vor dem Apex in zwei separate Kanäle mit getrennten Foraminae.

- Typ 8: Drei separate Kanäle ziehen von der Pulpenkammer bis zum Apex.

(Vertucci, Haddix & Britto 2006)

Nicht nur die Prävalenz der Wurzelkanalanzahl und ihr Verlauf variieren innerhalb der unterschiedlichen Zahntypen des menschlichen Gebisses, auch die Häufigkeit des Vorliegens und der Grad der Krümmung der Wurzelkanäle differiert.

Krümmungen in den Kanalverläufen im Seitenzahnbereich erscheinen regelmäßig (84%), doch nur wenige Wurzelkanäle (9%) besitzen einen Krümmungsradius über 35°, zumeist tritt nur eine schwache Krümmung von weniger als 27° auf (75%) (E. Schäfer 2002).

Bestimmte anatomische Auffälligkeiten sind vermehrt bei Individuen einzelner ethnischer Bevölkerungsgruppen vorzufinden. Dies zeigt sich in einem prozentual erhöhten Auftreten von zusätzlichen Seitenkanälen im ersten UK-Prämolar bei farbigen (32,8%) im Gegensatz zu hellhäutigen Personen (13,7%), aber auch anhand dem erhöhten Vorkommen von zweiten UK-Molaren innerhalb der asiatischen Bevölkerung, welche nur eine, C-förmig gebogene Wurzel besitzen (Vertucci, Haddix & Britto 2006).

Es treten in diesen Wurzeln unterschiedliche Konfigurationsmuster auf, wobei meist zwei oder drei Kanäle auffindbar sind, welche ein gemeinsames Foramen anstreben. Der sie verbindende Spalt zieht häufig von bukkal nach lingual (Weine 1998).

Die C-förmig gebogenen Wurzelkanäle werden in fünf anatomischen Kategorien eingeteilt:

- C 1: Es liegt ein vollständiges „C“ ohne Ab- oder Aufspaltungen vor.
- C 2: Der Kanal erscheint als Semikolon; dies resultiert aus einer Diskontinuität der Kontur des „C“.
- C3: Es liegen zwei oder drei getrennte Kanäle in einer C-förmigen Wurzel vor.
- C4: Es liegt nur ein einzelner runder bis ovaler Kanal vor.
- C5: Ein Kanallumen kann nicht festgestellt werden.

(Fan et al. 2004; Modifikation von Fan nach Melton)

Diese anatomischen Varianten (C1-C5) beeinträchtigen allesamt die vollständige Reinigung und Präparation des gesamten endodontischen Systems, da aufgrund der starken Krümmung im Kanalverlauf ein großes Risiko zur Perforation vorliegt und außerdem nicht alle Anteile des Wurzelkanals mit Hilfe der Instrumente erreicht werden können.

Bajonettförmige, doppelt gekrümmte, S-förmige Wurzelkanäle, welche mit einer Inzidenz von 17,5% aller Wurzelkanäle auftreten, stellen eine weitere Besonderheit dar. Die zweifache Krümmung des Kanals führt aufgrund seiner komplizierten Anatomie zu einem erhöhten Vorkommen von Begradigungen des Kanalverlaufs, Längenverlust und dem Auftreten von *Elbow-Zip*-Effekten (Hülsmann & Schäfer 2007).

Eine gründliche Diagnostik, sowohl röntgenologisch als auch manuell und visuell, ist daher zur Vorbereitung einer endodontischen Behandlung und während deren Verlauf nicht nur bei Vorliegen der genannten anatomischen Besonderheiten als ein wichtiges Kriterium für einen permanenten Erfolg der Behandlung zu verstehen.

2.2.2 Herausforderungen und Komplikationen bei der Wurzelkanalbehandlung

Die Zielsetzung einer endodontischen Behandlung mit Hilfe von maschinellen Aufbereitungssystemen weicht nicht von den Zielen der manuellen Aufbereitung ab. Es wird eine Entfernung des Pulpagewebes und die Eliminierung von Mikroorganismen angestrebt, wobei der ursprüngliche Wurzelkanalverlauf beibehalten werden soll (Stellungnahme DGZMK 2005).

Die allgemein gültigen Ziele auch bei stark gekrümmten, C- oder S-förmigen oder ovalen Kanalformen umzusetzen, stellt eine Herausforderung für den Behandelnden dar.

Die vollständige Präparation eines gekrümmten Kanals ist im Bereich der Krümmung nur selten möglich (Schneider 1971). Dies trifft insbesondere für die Wurzelkanäle in den *UK*-Molaren zu, in welchen keine Instrumentierungstechnik eine vorhersagbar runde Wurzelkanalform nach der Aufbereitung in den apikalen Bereichen produzieren kann (Jungmann et al. 1975). Vielmehr entsteht eine Aufweitung der Präparation des Kanals zwischen dem Bereich der Krümmung und

dem apikalen Endpunkt durch die Rotation der Feilen im Kanal, welche umso größer ist, je häufiger das Instrument gedreht wird. Diese Problematik hängt nicht von dem Grad der Krümmung des Kanals ab (Weine et al. 1976).

Liegt eine Kanalkrümmung von $> 30^\circ$ vor, tritt durch die Instrumentierung mit konventionellen, starren Handinstrumenten (*K-Feilen und Reamer*) häufig eine unerwünschte Formveränderung im Kanal auf (Schäfer & Tepel 1993). Eine entsprechend starke Krümmung im Kanalverlauf ist als wichtigster Faktor für die Gefahr einer Instrumentenfraktur anzusehen (Zelada et al. 2002), welche sich durch die starke mechanische Beanspruchung der Instrumente im gekrümmten Kanalanteil erklären lässt.

Ebenso erscheinen die Kanäle im Molarenbereich gehäuft auch oval. Dies erschwert die Entfernung von Hartsubstanz und Mikroorganismen, sodass unabhängig von der Instrumentationstechnik keine vollständige Präparation der Dentinwand im mittleren Kanaldrittel erreicht werden kann (Weiger et al. 2002). Hier kommt der chemischen Reinigung eine besondere Bedeutung zu, da anhand der Spülung des Kanals die Desinfektion der weniger ausgiebig bearbeiteten Wandanteile möglich ist.

Zur Vermeidung von Komplikationen ist zu beachten, dass im Rahmen der Trepanation ein geradliniger Zugang zum Kanal geschaffen wird. Vor der Aufbereitung ist eine gründliche Sondierung mit Instrumenten geringer ISO-Größe zur Erfassung des Kanalverlaufs zwingend notwendig. Zusätzlich muss eine adäquate Längenbestimmung röntgenologisch oder elektrometrisch erfolgen (Hülsmann & Schäfer 2007). Ebenso sollten für doppelt gekrümmte, S-förmige Wurzelkanäle keine Feilen verwendet werden, welche einen Taper > 4 besitzen (Bonaccorso et al. 2009). Die apikale Erweiterung sollte auf die ISO-Größe 25–30 bis auf Arbeitslänge beschränkt werden, da die Wahl eines größeren Instrumentes eine Verlagerung und Begradigung des Wurzelkanals provoziert (Madureira et al. 2010).

2.2.3 Instrumente zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung

2.2.3.1 Betrachtung der Entwicklung der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung

Als Meilensteine in der Entwicklung der maschinellen Wurzelkanalaufbereitung im vergangenen Jahrhundert sind die Einführung des *Cursor*-Winkelstücks im Jahre 1928 (*W & H; Bürmoos, Austria*), welches eine rotierende und vertikale

Feilenbewegung ermöglichte, sowie die Entwicklung des *Racer*-Winkelstücks im Jahre 1958 (*W & H*) mit rein vertikaler Bewegungsmöglichkeit anzusehen.

Weiterhin stellte die Firma *Micromega* (Besançon, Frankreich) im Jahre 1964 das *Giromatic*-Winkelstück vor, welches eine reziproke Bewegung um jeweils 90° ermöglichte.

Diese Winkelstücke ließen jedoch alle nur starre Bewegungsabläufe zu (Hülsmann 2000).

Eine Weiterentwicklung erzielte Levy im Jahre 1984 mit dem *Canal Finder* Winkelstück (S. E. T. Gröbenzell, Deutschland). Es war das erste Endodontiewinkelstück, welches sowohl eine vertikale Bewegung, als auch eine freie Rotation unter Friktion des Instruments im Wurzelkanal zuließ (Hülsmann 1996, Schäfer 1999).

Fünf Jahre später stellte die Firma *W & H* im Jahre 1989 das *Excalibur* Winkelstück vor, welches eine verbesserte Reinigungsleistung durch aleatorische, also rein zufällige und freie Bewegungsabläufe während der Aufbereitung hervorbrachte (*W&H* Deutschland GmbH).

Das nahezu zeitgleich eingeführte *Endoplaner*-Winkelstück (Firma *Microna*, Spreitenbach, Schweiz) hingegen arbeitet mit kleinen, koronalwärts gerichteten Schabbewegungen, die nur bei Kontakt zur Kanalwand und gleichzeitigem Zug des Winkelstücks aus dem Kanal einsetzen, sodass sich das Instrument beim Vorschub in den Kanal nicht bewegt.

Sowohl das *Canal Finder*-, das *Endoplaner*- als auch das *Excalibur*-Winkelstück zeigen allerdings in mehreren Studien verstärkte Begradigungen des Kanalverlaufs im Vergleich zu Handinstrumenten und können keine vollständige Entfernung des Debris und des Smear layers aus den Wurzelkanälen erzielen (Hülsmann et al. 1997; Hülsmann & Stryga 1993).

Diese Problematik stellt sich ebenfalls in der weitreichenden vergleichenden Studie der Göttinger Gruppe um M. Hülsmann dar, bei der die Aufbereitung durch konventionelle Endodontiewinkelstücke mit Edelstahlfeilen bezüglich Präparationsqualität, Arbeitssicherheit und Reinigungsfähigkeit verglichen wird (Hülsmann 2000).

Erst die Verwendung von *NiTi*-Feilen, zunächst als Handinstrumente, brachte den Durchbruch in der Aufbereitung, da diese Instrumente eine dreifach höhere Flexibilität in der Biegung und Torsion aufweisen wie eine verbesserte Frakturresistenz gegenüber den aus Edelstahl gefertigten Wurzelkanalinstrumenten bieten und somit eine geeignete Instrumentierungsmöglichkeit auch für gekrümmte Kanäle darstellen (Boleanos et al. 1988). Sie sind als Grundlage für die Entwicklung der

heute gebräuchlichen Feilensysteme anzusehen, da sich die Nickel-Titan-Legierung als hervorragender Werkstoff in Bezug auf die gewünschten Eigenschaften zur erfolgreichen Bearbeitung auch anatomisch schwer zugänglicher Regionen im Wurzelkanal herausstellte.

2.2.3.2 Nickel-Titan-Legierungen und ihre Eigenschaften

Die in der Endodontie gebräuchlichen Nickel-Titan-Legierungen bestehen zu 56% aus Nickel und zu 44% aus Titan, wodurch nahezu ein 1:1-Verhältnis der Hauptkomponenten in der Legierung vorliegt. Diese Verbindung wird *55-Nitinol* genannt. Sie kann die Art ihrer Atombindungen verändern, sodass diese in verschiedenen kristallinen Formen vorliegen, wodurch einzigartige mechanische Eigenschaften entstehen. Für die klinische Anwendung in der Endodontie sind besonders zwei Fähigkeiten der Legierung relevant, zum einen die herausragende Elastizität und zum anderen das *Formgedächtnis*. Sie kommen durch den Übergang der Atomstruktur von der *Austenit*-Struktur zur *Martensit*-Struktur zustande. Dieser Übergang kann durch die Erwärmung oder Abkühlung der Metalllegierung erzeugt werden, aber auch durch mechanische Beanspruchung, zum Beispiel bei der Verwendung von *NiTi*-Feilen während der Wurzelkanalbehandlung (Thompson 2000).

Bei einer Temperatur von 100°C liegt die Legierung in einem stabilen kubischen Gitter vor. Dies wird als *Austenit*-Phase bezeichnet. Durch eine Abkühlung unter eine *Transformationstemperaturschwelle* verändert die Legierung ihre Eigenschaften bezüglich Elastizität und Dehnbarkeit, was als *martensische Transformation* bezeichnet wird und mit einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften der Legierung einhergeht (Wang et al. 1972).

Die Herstellung von *NiTi*-Instrumenten ist aufwendiger als bei Edelstahlinstrumenten, da sie aus einem Block gefräst oder geschliffen und nicht wie die Edelstahlinstrumente durch Verwindung entstehen. Dies ist notwendig, da die Metalllegierung nicht permanent deformiert werden kann und somit bei dem Versuch, die Instrumente durch Verwindung herzustellen, die Gefahr der Instrumentenfraktur stark erhöht wird (Schäfer 1997).

Die hohe Elastizität der Nickel-Titan-Legierung erlaubt anhand der Wurzelkanalinstrumente eine besser zentrierte Kanalpräparation mit einer verringerten Transportationsgefahr und einer Abnahme des Auftretens von Kanalverlaufsveränderungen. Zusätzlich können Feilen dieser Metalllegierung auch in größeren

Taperbereichen hergestellt und angewandt werden. Dies ermöglicht eine Erweiterung der Kanalstruktur und somit eine verbesserte Spülung der Wurzelkanäle und trägt zu einer Erhöhung der Erfolgswahrscheinlichkeit der endodontischen Behandlung bei (Bergmans et al. 2001; Peters 2004).

2.2.3.3 Schneidendesign und Bearbeitungsfähigkeit/Schneidfähigkeit

Um die Schneiden von maschinellen Wurzelkanalinstrumenten zu beurteilen, sind verschiedene Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Dentin-/Weichgewebsabtrag (Materialentfernung) aus dem Wurzelkanal
- Beibehaltung oder Veränderung der ursprünglichen Kanal Anatomie
- Erzeugung von unerwünschten Präparationsabberationen

Dem Design der Schneiden der Nickel-Titan-Instrumente kommt eine große Bedeutung zu, da es ein Einschrauben und Festsetzen der Instrumente in der Kanalwand vermeiden kann und somit unerwünschte Präparationsergebnisse verhindert. Besonders zwei Gestaltungsmerkmale sind entscheidend:

1. Ein sogenanntes „*radial land area*“ zwischen den einzelnen Einkerbungen der Schneide.
2. Helikale Winkelmuster der Schneide

Für das Auftreten von Präparationsfehlern ist ein mangelhaftes Design der Feilen ein wichtiger Faktor. Es kann in mehreren Studien gezeigt werden, dass ein *apikaler Zip* oder eine Perforation häufiger durch Instrumente mit aktiven Schneidespitzen auftritt als durch Instrumente mit abgerundeten, nicht-schneidenden Spitzen (Peters 2004).

Das oben genannte Areal verhindert das Festsetzen der Schneide in der Dentinwand und der Abtrag des Dentins erfolgt eher durch ein Abhobeln von Dentinspänen. Hierbei werden diese Feilen in einen *U-Typ* und einen *H-Typ*

unterteilt, der jeweils die Form der einzelnen Schneidkerben beschreibt (Bergmans et al. 2001).

Bezugnehmend auf die Schneidleistung endodontischer Feilensysteme gibt es keine festgelegten Standards, sie kann lediglich bezüglich unterschiedlicher, beeinflussender Faktoren beurteilt werden. Der Winkel der Schneiden, in welchem sie auf die Dentinwand treffen, spielt eine zentrale Rolle. *NiTi*-Feilen besitzen zumeist einen neutralen (90°) bis leicht positiven Winkel. Dies erzeugt eine maximale Effektivität bei gleichzeitiger moderater Schwächung der Kanalwand. Ist der Winkel stärker positiv, neigt das Instrument dazu, sich tief in das Dentin der Kanalwand zu graben und dadurch einen höheren Abtrag zu erzeugen, was die Kanalwand übermäßig schwächt (Bergmans et al. 2001).

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Schneidleistung eines *NiTi*-Instruments ist die Tiefe der Einkerbungen der Schneide. Eine tiefe Einkerbung erlaubt einen verstärkten Abtransport von Debris. Dies ist wichtig zur Vermeidung einer Verblockung des Kanals durch Dentinspäne (Bergmans et al. 2001).

Zur genaueren Beurteilung der Schneidleistung von rotierenden Wurzelkanalinstrumenten muss auch die Vickershärte der entsprechenden Legierungen berücksichtigt werden (Bergmans et al. 2001). Die Oberflächenhärte der *NiTi*-Legierung und damit der Wurzelkanalinstrumente ist wesentlich geringer als die der Edelmetallinstrumente (Schäfer & Oitzinger 2008). Dies führt zu einer geringeren Schneidleistung gegenüber den Edelmetallinstrumenten, insbesondere in schwer zugänglichen Regionen innerhalb der Wurzelkanäle, wie beispielsweise bei einer starken Krümmung. Dies bedingt zwar eine längere Arbeitsdauer, verhindert aber verstärkte Kanaltransportationen (Schäfer 1999).

Somit ist das Schneidendesign maßgeblich für die Reinigungsleistung der Wurzelkanalinstrumente. Dabei hat die Art des maschinellen Antriebs, unabhängig davon, ob er vollrotierend oder reziprok ist, keinen Einfluss auf die Schneidleistung (You et al. 2011).

2.2.3.4 Das Drehmoment im Zusammenhang mit der Wurzelkanalaufbereitung

Werden die Nickel-Titan-Instrumente in den genannten Winkelstücken mit konventionellen, dentalen Antriebsmotoren verwendet, führt dies zu einer hohen Frakturgefahr der Instrumente im Wurzelkanal. Daher müssen sie mit speziellen Motoren mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Drehmoment verwendet werden (Hülsmann et al. 2005).

Das Drehmoment muss genau unterhalb des Elastizitätslimits des entsprechenden Instrumentes liegen. Motoren mit einem hohen Drehmoment erzielen zwar eine höhere Schneideffizienz der Feilen im Dentin und vermeiden eine weitreichende Blockierung der Feilen während der Aufbereitung, aber aufgrund des Überschreitens der durch das Elastizitätslimit vorgegebenen Drehmomentgröße ist hier die Frakturgefahr der Instrumente stark erhöht. Durch die Größe des Drehmoments wird eine entsprechende Belastung auf das Instrument ausgeübt. Diese ist besonders groß in gekrümmten Wurzelkanälen, da der Widerstand der Dentinwand gegenüber dem Instrument hier größer ist als in geraden Kanälen (Gambarini 2000).

Jedes Instrument hat ein spezifisches ideales Drehmoment entsprechend seiner ISO- Größe und seiner Konizität (*Taper*), wobei die Werte für Instrumente geringerer ISO- Größe und geringen Tapers niedriger sind und bei einer großen ISO- Größe und großem Taper größer (Gambarini 2000; Sattapan & Palamara 2000; Yum et al. 2011; Guilford et al. 2005).

Durch die Verwendung von Endodontiemotoren mit geringen Drehmomentwerten kann auch die zyklische Ermüdung der rotierend verwendeten *NiTi*-Feilen reduziert werden (Gambarini 2001).

Auf diese Eigenschaften geht der *Step-Motor* (*Endo-Stepper*, *SET*, Emmering, Deutschland) ein, indem er durch seine computergesteuerte Elektronik eine Feineinstellung der Drehmomentbegrenzung für die Feilen jeder handelsüblichen Marke erlaubt. Dadurch wird das Elastizitätslimit der einzelnen Feilen nicht überschritten. Wird diese Grenze während der Aufbereitung durch Behinderungen im Kanalverlauf erreicht, stoppt der Motor augenblicklich. Nach der Beurteilung des äußeren Widerstands setzt der Motor sich dann wieder in Bewegung. Hat sich das Instrument im Kanal festgesetzt, löst er dieses durch entsprechende Links-Rechts-Wechselbewegungen. Sobald keine Behinderung der Instrumentenbeweglichkeit mehr vorliegt, führt der Motor wieder das normale, programmierte Bewegungsmuster aus. Dieser Sicherungsmechanismus dient ebenso wie die

eingestellte Drehmomentbegrenzung der Vermeidung von Instrumentenfrakturen (Gambarini 2000).

Als negativer Aspekt in der Anwendung des Endostepper-Antriebs ist die durch das geringe Drehmoment verursachte Reduktion der Schneideeffizienz der Feilen und somit verlängerte Arbeitszeit anzusehen, welche aber durch das geringere Frakturrisiko der Instrumente aufgewogen wird (Gambarini 2000).

Die Verwendung von erwärmtem (21° - 60° C) *NaOCl* im Zusammenhang mit Nickel-Titan-Instrumenten ist kritisch zu beurteilen, wobei das *NaOCl* zwar keinen Effekt auf die Torsionsresistenz der Feilen hat, aber die Resistenz der Feilen gegenüber zyklischer Ermüdungserscheinungen signifikant vermindert ist. Daher sollten Instrumente nach der Anwendung mit erwärmtem *NaOCl* wie Einmal-Instrumente verworfen werden (Peters et al. 2007).

2.2.3.5 Der Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit auf die *NiTi*-Feilen während der maschinellen Aufbereitung

Die Rotationsgeschwindigkeit, mit welcher die Nickel-Titan- Feilen im Kanal bewegt werden, wirkt sich differenziert auf die Wurzelkanalinstrumente aus. Mit einer Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit steigt das Risiko der Feilen-separation stark an. Wird die Geschwindigkeit verdoppelt, z. B. von 166,67 U/min auf 333,33 U/min, vervierfacht sich das Risiko (Gabel et al. 1999).

Weiterhin nimmt die Rotationsgeschwindigkeit auch Einfluss auf das Frakturrisiko im Zusammenhang mit der Größe der Konizität der verwendeten Feilen. Je größer der Taper des Instruments ist, desto schneller frakturiert selbiges bei gleichbleibender Geschwindigkeit. Zusätzlich beeinflusst auch der Winkel, in welchem die Feile im Kanal rotiert wird, in Abhängigkeit von der Größe des Tapers die Frakturgefahr. Je größer der betreffende Winkel ist und je kleiner der Taper, desto geringer ist die Anzahl an Rotationszyklen, denen das Instrument ohne Fraktur standhält (Kitchens et al. 2007).

Dies zeigt, dass auch in Bezug auf die Rotationsgeschwindigkeit die Krümmung eines Wurzelkanals ein ausschlaggebender Faktor bei der Beurteilung des Risikos einer Feilenfraktur ist (Serper & Calt 2002).

2.2.3.6 Widerstandsfähigkeit gegenüber der Biegung von *NiTi*-Instrumenten

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber der Biegung kann nach Aussage der *International Organisation for Standardization (ISO 3630)* durch die Fixierung der zu testenden Feile mit 3mm seiner Spitze in der Testapparatur (*MAGTROL*, FTS-100, Buffalo, NY) und folgender Biegung dieser Feile um 45° gemessen werden. Bei diesem Steifheitstest werden die gemessenen Werte in g/cm² angegeben (Testarelli et al. 2011; Schäfer et al. 2003).

Die Biegefähigkeit von *NiTi*-Instrumenten ist von der Querschnittsfläche des Instruments abhängig. Hierbei haben Feilen mit einer dreieckigen Querschnittsstruktur das größte Biegemoment. Je größer das Biegemoment ist, desto größer ist die Steifheit des Instruments und damit seine Widerstandsfähigkeit gegenüber der Biegung. Zusätzlich besteht auch eine Abhängigkeit des Biegemoments eines Wurzelkanalinstruments von seiner *ISO*-Größe und seinem Taper. Das Biegemoment wächst je nach Feilenquerschnitt (dreieckig, viereckig oder rund) exponentiell oder linear zur Größe der Feile (Camps et al. 1995; Pongione et al. 2000).

Eine hohe elastische Flexibilität und damit ein geringeres Biegemoment sind essentiell für die Aufbereitung des apikalen Drittels von Wurzelkanälen, insbesondere wenn die Kanäle in diesem Bereich eine starke Krümmung aufweisen (Pongione et al. 2000).

Nitinol-Feilen weisen in dieser Beziehung eine dreifach höhere Flexibilität in der Biegung auf als Edelstahl-Feilen gleicher *ISO*-Größe und gleichen Tapers. Die hohe Flexibilität kann auf die besonderen metallurgischen Eigenschaften der *NiTi*-Legierungen zurückgeführt werden, wie etwa ihr niedriges Elastizitätsmodul (Walia et al. 1988; Pongione et al. 2000).

2.3 Spülflüssigkeiten und Smear layer

2.3.1 Bedeutung der Wurzelkanalspülung für die Endodontie

Mikroorganismen, welche entweder nach der Wurzelkanalbehandlung noch im Kanal verbleiben oder das gefüllte Wurzelkanalsystem von apikal bzw. koronal aus wiederbesiedeln, sind der Hauptgrund für das Versagen einer endodontischen Behandlung. Daher ist das Ziel jeder Wurzelkanalbehandlung die Desinfektion des Kanalsystems sowie die Versorgung des Kanals mit einer dichten Wurzelfüllung, um eine Reinfektion zu verhindern (Zehnder 2006).

Die Behandlung eines erkrankten Zahnes ist bei einer Vitalexstirpation der Pulpa auf eine Asepsis fokussiert, das heißt auf die Prävention der Infektion einer primär sterilen Umgebung. Dies ist die apikale Region des Wurzelkanals. Bei der Behandlung einer Pulpagangrän hingegen steht die Antisepsis und somit die Entfernung aller Mikroorganismen aus dem Wurzelkanalsystem im Vordergrund (Zehnder 2006).

Dies wird durch eine chemomechanische Aufbereitung des Wurzelkanals erzielt. Die chemische Komponente besteht aus der Spülung des Wurzelkanals mittels verschiedener Spüllösungen. Sie dienen zur:

- Auflösung von nekrotischem Pulpagewebe
- Inaktivierung von Endotoxinen
- Eliminierung anaerober und fakultativ anaerober Mikroorganismen anhand ihrer unterschiedlichen Wirkspektren
- Entfernung des bei der Instrumentierung entstandenen Smear layers

Allerdings dürfen die endodontischen Spüllösungen nicht toxisch sein, da sie auch mit vitalem, zum Beispiel periodontalem Gewebe, in Kontakt kommen können. Weiterhin dürfen keine anaphylaktischen Beschwerdebilder hervorgerufen werden. Zusätzlich sind sie so einzusetzen, dass sie ihre Wirkung im Kanal voll entfalten können und sich durch chemische Wechselwirkungen weder schwächen oder behindern (Zehnder 2006).

2.3.2 Natriumhypochlorit

Chlorverbindungen sind im menschlichen Körper auch ein Teil der unspezifischen Abwehr und werden von den neutrophilen Granulozyten erzeugt (Test et al. 1984).

Dabei liegt das reaktive Chlor in zwei unterschiedlichen Formen vor:

- 1) Hypochlorid (OCI^-)
- 2) Hypochlorige Säure ($HOCl$)

Beide Formen sind extrem reaktive oxydative Agenzien (Dychdala 1991). Eine reine Hypochloritlösung, wie sie in der Endodontie verwendet wird, hat einen pH von 12 und das gesamte freie Chlor ist als OCI^- vorhanden (Grande 2006).

$NaOCI$ agiert hier als organischer und fettlösender Wirkstoff, indem es Fettsäuren auf ihre Salze (Seifen) und Glycerin (Alkohol) reduziert. Der antimikrobielle Effekt des $NaOCI$ basiert auf seinem hohen pH , wodurch es als starke Base gilt. Der hohe pH -Wert führt zu einer Schädigung der Integrität der zytoplasmatischen Membran von Bakterien durch die irreversible enzymatische Hemmung und der daraus resultierenden Veränderung des zellulären Metabolismus. Dies führt schließlich zum Untergang des Organismus (Estrela et al. 2002).

Weiterhin ist $NaOCI$ ein gewebsauflösendes Agens, es bewirkt einen „digestive effect“ auf das pulpaie Restgewebe im Wurzelkanal (Trepagnier et al. 1978).

In höheren Konzentrationen (1-2,5%) ist diese Fähigkeit ausgeprägter als bei niedrigeren Konzentrationen (0,5%), allerdings kann die Wirkung des niedrigkonzentrierten $NaOCI$ durch ein größeres Spülvolumen sowie durch eine längere Verweildauer im Wurzelkanal gesteigert werden (Baumgartner & Cuenin 1992).

Eine Messung der Effektivität in der Gewebezersetzung einer Natriumhypochloritlösung erfolgt anhand der Messung des Hydroxyprolinegehalts nach der Entfernung der Spüllösung aus dem Kanal, da das Hydroxyprolin die Menge des in der Spüllösung gelösten kollagenhaltigen Gewebes repräsentiert (Trepagnier et al. 1978).

Als alleinige Spülung entfernt $NaOCI$ jedoch nur das an den Kanalwänden verbliebene Pulpagewebe. Der bei der Instrumentierung entstehende Smear layer ist nach der Spülung mit $NaOCI$ noch vorhanden (Baumgartner & Mader 1987).

Auch limitiert ein schmales Kanallumen den Lösungseffekt der Spüllösung, weshalb $NaOCI$ seine höchste Wirksamkeit im koronalen und mittleren Kanal-drittel entfaltet (Hand et al. 1978).

Die Penetrationstiefe des *NaOCl* in die Dentintubuli wird wie seine gewebsauflösende Wirkung durch eine höhere Konzentration des Wirkstoffs in der Spülung sowie einer langen Verweildauer im Kanal zum Positiven beeinflusst. Während der Instrumentierung muss der Wurzelkanal daher immer mit *NaOCl* gefüllt sein, damit eine lange Verweildauer der Spülflüssigkeit im Kanalsystem sichergestellt ist (Yamada et al. 1983).

Die Temperatur der Spülung beim Einbringen in den Kanal beeinflusst seine Wirkung hingegen nur unwesentlich (Zou et al. 2010).

2.3.3 Smear layer

Die Instrumentierung und die dadurch erfolgende Erweiterung des Wurzelkanallumens führen zur Entstehung der Schmierschicht, welche nach der alleinigen Spülung des Wurzelkanals mit Natriumhypochlorit an den Dentinwänden anhaftend bleibt (McComb & Smith 1975).

Sie überzieht die Wurzelkanalwände und verschließt die Öffnungen der Dentintubuli. Ihre organischen und anorganischen Anteile liegen dem Dentin in einer 1-2 µm dicken Schicht auf, sie können aber bis zu 40 µm in die Tiefe der Tubuli eindringen und die dort befindlichen Bakterien schützen, was in Konsequenz das Versagen der endodontischen Behandlung des betreffenden Zahnes zur Folge hat (Torabinejad et al. 2002).

Diese Schmierschicht vermag nicht nur das Eindringen von Medikamenten in die Tiefe der Dentintubuli zu verhindern, sie behindert durch deren Verschluss ebenfalls eine dichte und wandständige Füllung des Wurzelkanalsystems mit Guttapercha (Yoshida et al. 1995).

Da der Smear layer aus sehr kleinen Partikeln besteht, ist er aber in Säuren gut löslich (Torabinejad et al. 2002).

Chelatoren wie *EDTA* sind effektiv in der Entfernung des anorganischen Anteils der Schmierschicht. Weiterhin sind auch Zitronen- und Phosphorsäure in hohen Konzentrationen (30-40%) zur Lösung der anorganischen Teilchen anwendbar. Wasserstoffperoxid hingegen besitzt keine Wirksamkeit (Petschelt & Oberschachtsiek 1985).

Um den organischen Anteil des Smear layers zu lösen, ist *NaOCl* das Mittel der Wahl, da es Pulparestes und Prädentin beseitigt. Mehrere Studien zeigen, dass

eine optimale Reinigung durch eine Kombination beider Wirkungsbereiche durch eine Spülung mit *EDTA* und eine darauf folgende finale Spülung mit *NaOCl* erlangt wird, da sie den Smear layer suffizient löst und aus dem Wurzelkanal herausbefördert (Torabinejad et al. 2002).

2.3.4 *EDTA*

Eine Spülung des Wurzelkanals mit Ethylendiaminetetraacetat entfernt einen Bestandteil des Smear layers und führt weiterhin zu einer zusätzlichen Erweiterung des Kanallumens in die Tubuli hinein. Allerdings wird hierdurch auch eine Denaturierung der Kollagenfasern in den Tubuli herbeigeführt. Dies geschieht anhand der demineralisierenden Eigenschaft des Wirkstoffs. Zusätzlich bewirkt dieser auch eine Erweichung des Dentins (Garberiglio & Becce 1994).

Weiterhin konditioniert das *EDTA* die Dentinkanälchen dahingehend, dass eine verbesserte Adhäsion der Wurzelkanalfüllmaterialien möglich ist (Goldberg & Abramovich 1977).

Im klinischen Gebrauch haben sich niedrig konzentrierte *EDTA*-Spüllösungen bewährt, da eine Steigerung der Konzentration in der Lösung keine signifikanten Unterschiede in der Entfernung des Smear layers erbringen konnte. Bei der Verwendung von 15%-, 10%- und 5%-iger *EDTA*-Lösungen ist eine exzessive Erosion des Dentins in den Tubuli festzustellen, welche es zu vermeiden gilt (Sen et al. 2009).

Wiederum stellt die Zeit, in welcher die Lösung auf die Wurzelkanalwände einwirkt, ähnlich wie bei der Wirkungsweise des Natriumhypochlorids, einen entscheidenden Faktor in der Wirksamkeit dar. Nach einminütiger Verweildauer des *EDTA* im Kanal wird eine suffiziente Smear layer-Entfernung erzielt. Dem hingegen führt eine verlängerte Einwirkzeit von zehn Minuten im *Ex-vivo*-Experiment zu starken Erosionsbildern an den Dentinwänden, weshalb eine kurze Spüldauer empfohlen wird (Calt & Serper 2002).

Dabei ist die Menge an *EDTA*-Spüllösung, mit der die Wurzelkanäle gespült werden, unbedeutend. Schon 1 ml *EDTA*-Lösung erbringt eine zufriedenstellende Darstellung der Dentinkanälchen und eine Versäuberung der Wurzelkanalwände (Crumpton et al. 2005).

2.3.5 Wechselwirkungen von *EDTA* und *NaOCl*

Eine alternierende Spülung mit Natriumhypochlorit und Ethylendiamintetraacetat vereint die positiven Eigenschaften beider Spüllösungen miteinander, nämlich zum einen die Gewebeauflösung, welche durch das *NaOCl* bewirkt wird und zum anderen die Fähigkeit zur Entfernung des Smear layers durch *EDTA*. Allerdings treten bei der gemeinsamen Anwendung der beiden Spüllösungen auch unerwünschte Wechselwirkungen auf. Durch die Oxidationsfähigkeit von *NaOCl* kommt es zwar nur zu einer geringen Beeinträchtigung bezüglich der Ca^{2+} -Chelierungsaktivität des *EDTA*, aber zu einer langsamen und progressiven Degradation des Atomverbundes. *EDTA* verursacht im Gegenzug eine sofortige Eliminierung des freien Chlors, welches in der *NaOCl*- Flüssigkeit gelöst vorliegt, und schränkt somit seine antimikrobielle und gewebsauflösende Wirkung ein (Zehnder 2006, Grawehr et al. 2003).

Des Weiteren wird durch die gemeinsame Verwendung von hochprozentigem *NaOCl* und *EDTA* die Oberflächenspannung der Kanalwände des Wurzelkanals erhöht. Dies führt zu einem stark vergrößerten Frakturrisiko des betroffenen Zahnes. Daher ist nur niedrig konzentriertes *NaOCl* gemeinsam mit *EDTA* zu verwenden (Rajasingham et al. 2010).

Trotzdem ist *NaOCl* als finale Spülung in der Wurzelkanalbehandlung einsetzbar, da es dann gewünscht zu einer Inaktivierung des *EDTA* führt (Grande et al. 2006).

Gemeinsam sind *NaOCl* und *EDTA* ein gutes Instrument, um einen der am häufigsten für die Erkrankung des Endodonts ursächlichen Keime zu eliminieren, den *Enterococcus faecalis* (Soares et al. 2010).

3 Zielsetzung der Arbeit

Die moderne Zahnmedizin ist darauf ausgerichtet, dass wirtschaftlich effiziente und qualitativ hochwertige Behandlungen am Patienten durchgeführt werden. Daher zielen die Entwicklungen der Dentalindustrie auch bezüglich endodontischer Behandlungen auf ein zeitsparendes und patientengerechtes Management ab.

Die vorgelegte Arbeit vergleicht die maschinellen Aufbereitungssysteme *ProTaper*, *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider*, wodurch sowohl Einfeilensysteme als auch Mehrfeilensysteme mit reziprokem oder vollrotierendem Antrieb in die Studie einbezogen werden. Unter Anwendung eines Beurteilungssystems (sog. Score-System) soll die Reinigungsleistung anhand der Parameter Debris, Smear layer und Kanalwandbeschaffenheit nach der Wurzelkanalaufbereitung mittels verschiedener Ein-Feilen-Systeme bei gleichen Aufbereitungsmodalitäten im Vergleich zu vollrotierenden Systemen bewertet werden. Ferner soll analysiert werden, ob eine qualitativ gleichwertige Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle erzielt werden kann.

Weiterhin soll durch Röntgendokumentation dargestellt werden, ob die reziproke oder vollrotierende Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle unterschiedliche Werte hinsichtlich der Begradigungstendenz aufweist. Schlussfolgernd soll ermittelt werden, welches der genannten vier Systeme die beste Eignung für die Aufbereitung gekrümmter Kanäle besitzt.

Folgende Hypothesen werden hierbei erörtert:

1. Anhand eines *Single-file* Systems kann bei gleichen Aufbereitungsmodalitäten unter Berücksichtigung bestimmter Parameter eine zu permanent rotierenden Systemen gleichwertige Aufbereitung der gekrümmten Wurzelkanäle erfolgen.

2. Die Aufbereitungsqualität ist unabhängig von der Antriebsweise der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (vollrotierend oder reziprok/ oszillierend).

4 Material und Methode

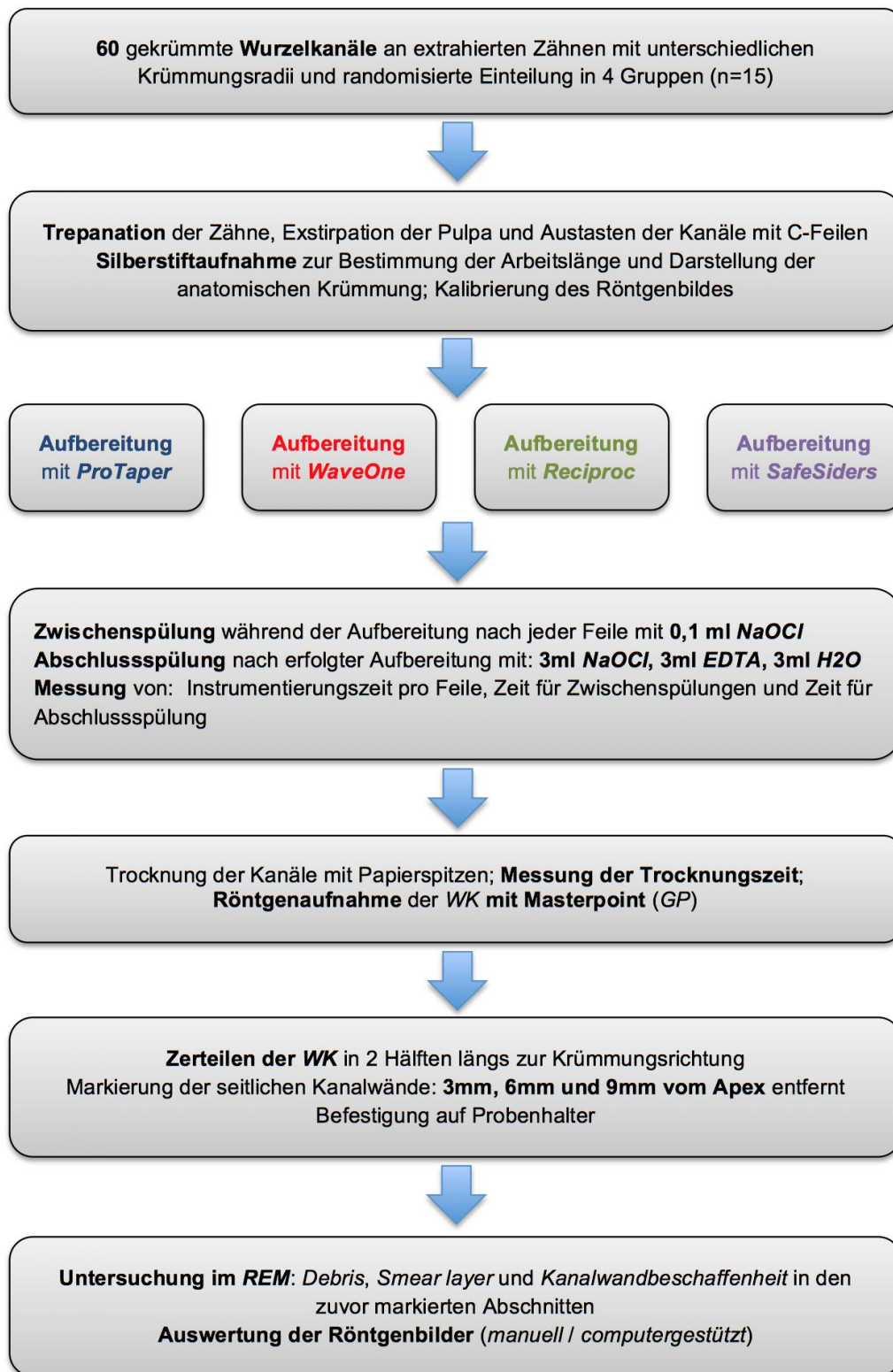


Abb.1: Flowchart des Versuchsablaufes

4.1 Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wurden 60 Seitenzähne, welche aufgrund unterschiedlicher Indikationen extrahiert worden waren, gesammelt. Diese wurden zunächst in eine Thymollösung eingelegt und im Folgenden gereinigt. Die Zähne wurden trepaniert, die Kanaleingänge wurden aufgesucht und dargestellt. Die Pulpa wurde exstirpiert und die Wurzelkanäle mit C-Feilen der ISO-Größen 6, 8, 10 und 12 ausgetastet. Dann wurden die Wurzelkanäle bis ISO-Größe 15 jeweils mit einem Reamer aufbereitet, die manuell bestimmte Wurzelkanallänge wurde notiert und ein Silberstift zur röntgenologischen Längenbestimmung wurde inseriert.

Um die Reproduzierbarkeit der nun folgenden Röntgenaufnahme zu gewährleisten, wurden die Zähne außen am linken oberen Rand der Zugangskavität mit *Composite* markiert. Daraufhin wurden sie mit Hilfe von *Boxing-Wax* in einem Plexiglaskästchen fixiert, auf dessen Rückseite der Röntgenfilm platziert und befestigt wurde. Es wurde eine Silberstiftaufnahme angefertigt und anhand der zuvor notierten Länge der Silberstifte das Röntgenbild am PC mit der *Digora* Software kalibriert, sodass nun die Arbeitslänge für die Wurzelkanalaufbereitung vorlag.

Die Zähne wurden in 4 Gruppen (A, B, C, D) gleicher Größe aufgeteilt, sodass ein Probenvolumen von 15 Wurzelkanälen pro maschinellen Aufbereitungssystem entstanden:

Gruppe A	➔	<i>ProTaper</i>
Gruppe B	➔	<i>WaveOne</i>
Gruppe C	➔	<i>Reciproc</i>
Gruppe D	➔	<i>SafeSider</i>

Die einzelnen Wurzelkanäle wurden nummerisch erfasst und entsprechend in beschriftete Probenbehälter mit einer Thymollösung gebracht.

Die Wurzelkanalaufbereitung erfolgte im angefeuchteten Kanal (Anfeuchtung durch *NaOC*). Die Feilen der jeweiligen Systeme wurden nach der Aufbereitung eines einzelnen Kanals verworfen (*Single-Use*). Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgte jeweils bis ISO-Größe 25. Um sie während der Aufbereitung von Dentinspänen und Debris zu reinigen, wurde ein Interimsständer mit 3% H_2O_2 -Lösung genutzt.

Nach der Nutzung jeder Feile wurde eine Zwischenspülung zur Entfernung von Dentinspänen mit 0,1 ml *NaOCl* durchgeführt. Weiterhin wurden sowohl die Zeit, die für die einzelnen Aufbereitungsschritte benötigt wurde, als auch die benötigte Zeit für die Zwischenspülungen gemessen. Nach erfolgter Aufbereitung der Wurzelkanäle bis zur röntgenologisch bestimmten Arbeitslänge wurde eine Abschlusspülung vorgenommen, und die hierzu aufgewendete Zeit wurde ebenfalls erfasst. Die Abschlusspülung setzte sich aus 3 ml *NaOCl*, 3 ml *EDTA* und 3 ml *H₂O* in genannter Reihenfolge zusammen. Daraufhin wurden die Wurzelkanäle mittels Papierspitzen der *ISO*-Größe 25 getrocknet, wobei die Trocknungszeit auch gemessen wurde. Somit wurden während der vollständigen Wurzelkanalaufbereitung insgesamt folgende Zeiten gemessen:

- Aufbereitungszeit pro Feile
- Zeit für die einzelnen Zwischenspülungen pro Kanal
- Zeit für die Abschlusspülung mit den einzelnen Substanzen pro Kanal
- Trocknungszeit pro Kanal mit Papierspitzen

Die gemessenen Zeiten wurden sowohl im Einzelnen als auch in ihrer Gesamtheit in der Versuchsauswertung betrachtet. In die getrockneten Kanäle wurden *ISO*-genormte Guttaperchapoints eingebracht. Es erfolgte eine Masterpointaufnahme mit Hilfe des schon bei der Silberstiftaufnahme verwendeten Plexiglaskästchens in der dort definierten und reproduzierbaren Position der Zähne.

Anhand der nun vorliegenden Röntgenaufnahmen der Wurzelkanäle vor und nach der Aufbereitung wurden die Bilder bezüglich der Veränderung des Kanalverlaufs durch die Aufbereitung sowie bezüglich des Grades der Kanalkrümmung ausgewertet.

Weiterhin wurden die Zähne nun entlang des Längsverlaufs des Kanals in Bezug auf die Wurzelkanalkrümmung an der Außenseite markiert. Die koronale Zugangskavität und der Apex wurden mit einem dünnfließenden Silikon (*Silasoft N*, *Detax Dental*, *Ettlingen*, *Deutschland*) verschlossen, um ein Eindringen von Hartsubstanzspänen in den Wurzelkanal während des Zerteilens des Zahnes zu verhindern.

Im Folgenden wurden die Zähne mit einer Diamanttrennscheibe (Renfert, Hilzingen, Deutschland) in zwei Hälften zerteilt, sodass der Wurzelkanal sichtbar wurde. Die Zahnhälften wurden an beiden Seiten der Wurzelkanalwand anhand eines Skalpell im Abstand von 3 mm, 6 mm und 9 mm vom Apex nach koronal

führend markiert und dann auf einem Probenträger (*Agar Scientific Ltd.*; Stansted, UK) mittels *Leit-C-Plast* (*Agar Scientific Ltd.*) befestigt.

Abschließend wurden die Proben im Bereich der oben genannten Abschnitte im Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Dies geschah im Bereich zweier unterschiedlicher Vergrößerungsmodi und Topographien. Es wurden zusätzlich Übersichtsaufnahmen im lichtmikroskopischen Vergrößerungsbereich, sowie Übersichtsaufnahmen im elektronenmikroskopischen Vergrößerungsbereich erstellt (Abb.1). Dabei wurden die Aufnahmen im mikroskopischen Bereich unter folgenden Einstellungen vorgenommen:



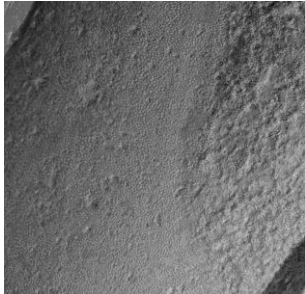
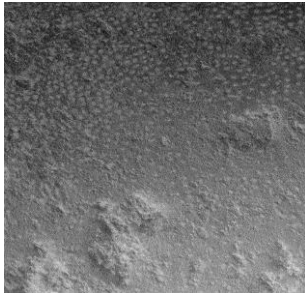
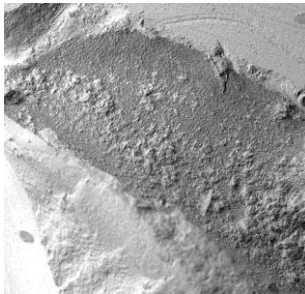
1. 300-450 μm
2. 850-1000 μm

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wurden in Bezug auf drei unterschiedliche Kriterien ausgewertet:

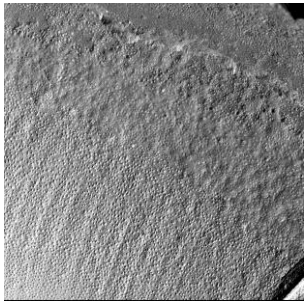
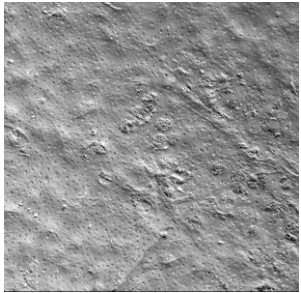
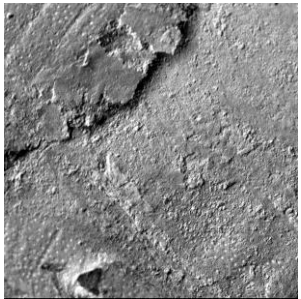
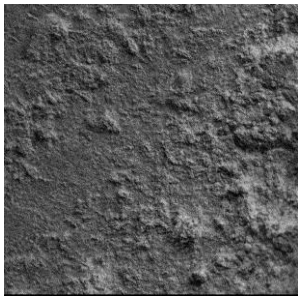
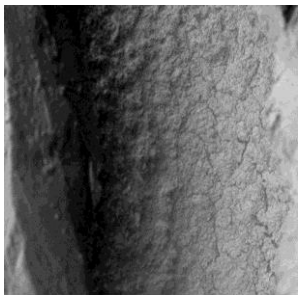
- Debris
- Smear layer
- Kanalwandbeschaffenheit

Dies geschah nach dem Score-System, wie in Tab.1, 2 und 3 dargestellt wird (Hülsmann et al. 1997).

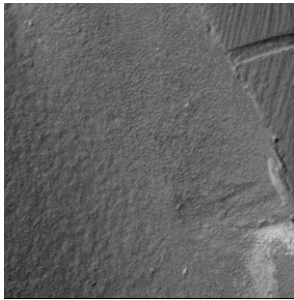
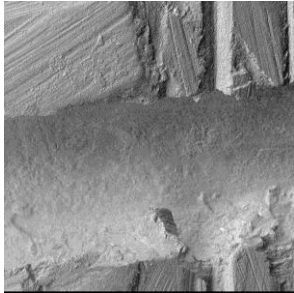
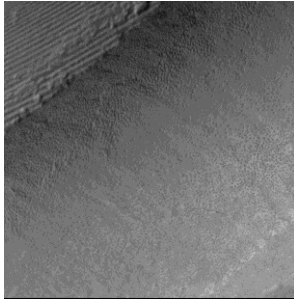
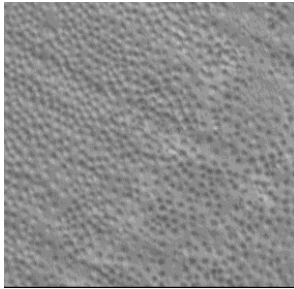
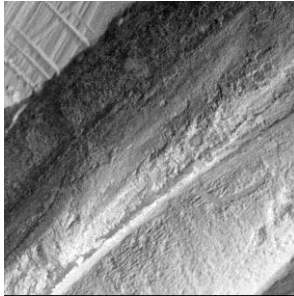
Die Bilder wurden von zwei Personen unabhängig voneinander ausgewertet. Die erhobenen Rohdaten wurden daraufhin statistisch ausgewertet.

Debris		
Score 1		Saubere Wurzelkanalwand; nur wenige Debrispartikel
Score 2		Einige kleine Ansammlungen an Debris
Score 3		Viele Ansammlungen an Debris; bedecken weniger als 50% der Wurzelkanalwand
Score 4		Mehr als 50% der Wurzelkanalwand sind mit Debris bedeckt
Score 5		Die Wurzelkanalwand ist (fast) vollständig mit Debris bedeckt

Tab.1: Score-System für den Debris

Smear layer		
Score 1		Kein Smear layer; Dentinkanälchen offen
Score 2		Geringes Vorkommen an Smear layer, einige Dentinkanälchen offen
Score 3		Homogene Smear layer Schicht bedeckt die Wurzelkanalwand; nur wenige Dentinkanälchen offen
Score 4		Die Wurzelkanalwand ist vollständig mit einem homogenen Smear layer bedeckt; keine offenen Dentinkanälchen
Score 5		Inhomogener Smear layer bedeckt die gesamte Wurzelkanalwand

Tab.2: Score-System für den Smear layer

Kanalwandbeschaffenheit		
Score 1		Glatte Wurzelkanalwand, keine sichtbaren Riefen vorhanden
Score 2		Leichte Riefen in der Oberfläche der Kanalwand zu sehen
Score 3		Deutlich sichtbare Riefen in der Oberfläche des Wurzelkanals vorhanden
Score 4		Leichtes Wellenprofil in der Wurzelkanalwand erkennbar
Score 5		Deutliches Wellenprofil in der Wurzelkanalwand sichtbar

Tab.3: Score-System für die Kanalwandbeschaffenheit

4.1.1 Verwendete Geräte und Instrumente

Verwendete Handinstrumente

a) *C-Feilen*

Zum Aufsuchen der Kanaleingänge nach der Trepanation sowie zum manuellen Austasten und Katheterisierung der Kanäle wurden *C-Pilot* Feilen (Abb.2) aus Edelstahl (VDW GmbH; München, Deutschland) in den ISO-Größen 6, 8, 10 und 12,5 verwendet.

b) *Reamer*

Vor der Insertion der Silberstifte wurden die Wurzelkanäle zu deren Aufnahme mit *K-Feilen* (VDW GmbH) bis zu der ISO-Größe 15 erweitert (Abb.3).



Abb.2: *C Pilot* #10



Abb.3: *K-Feile* #15

Maschinelle Aufbereitungssysteme

a) *ProTaper Universal*

Zur vollrotierenden maschinellen Aufbereitung der Wurzelkanäle wurde für die Versuchsgruppe A das Aufbereitungssystem *ProTaper* verwendet (*DENTSPLY* Maillefer; Ballaigues, Schweiz). Es besteht insgesamt aus acht *NiTi*-Feilen (Abb.4).

Die Hilfs-Feilen *SX* haben keine Markierung und eine Länge von 19 mm. Der *Taper* dieses Instruments steigt von 3,5% apikal auf 29% koronal an. Sie dienen zum Ausformen von kurzen Kanälen oder zur Bereitung eines Gleitpfades in längeren Kanälen und sind ein Ersatz für *Gates Glidden* Bohrer. Weiterhin können sie zur Erweiterung einer vorhandenen Kanalpräparation verwendet werden.

Die Ausformungsfeilen (*shaping files*) Nr. 1 (*S1*) und Nr. 2 (*S2*) haben eine lila und eine weiße Markierung. Sie besitzen einen von apikal nach koronal ansteigenden *Taper*, sodass verschiedene Areale der Kanäle präpariert werden können. Die Feile *S1* wird zur Bearbeitung des koronalen Kanaldrittels benutzt und die Feile *S2* für die Erweiterung des mittleren Kanaldrittels. Sie dienen nur bedingt zur progressiven Abtragung im apikalen Kanaldrittel.

Die Abschlussfeilen (*finishing files*) sind in fünf unterschiedliche Feilen unterteilt:

F1: Taper 7%; gelbe Markierung; Größe .07/#20

F2: Taper 8%; blaue Markierung; Größe .08/#25

F3: Taper 9%; rote Markierung; Größe .09/#30

F4: Taper 6%; zweifach schwarze Markierung; Größe .06/#40

F5: Taper 5%; zweifach gelbe Markierung; Größe .05/#50

Diese Abschlussfeilen dienen zur Aufbereitung des apikalen Kanaldrittels.

Die *ProTaper* Feilen sind in den Längen von 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Sie haben einen konvexen, triangulären Querschnitt und einen helikalen Schneidwinkel. Dieser sorgt für die Beförderung des Debris aus dem Kanal, wobei auch das Einschrauben der Feile in den Kanal verhindert wird.

Die Taperreduzierung verringert die Gefahr des „*taper-lock*“. Die modifizierte „*guiding*“ Spitze der Instrumente erlaubt ihnen entsprechend der Angaben des Herstellers, der Kanalanatomie gut zu folgen und verbessert die Fähigkeit zum Abtrag von weichem Gewebe sowie von Debris.

Die Feilen sind in einer definierten Abfolge zu verwenden: (SX)-S1-S2-F1-F2-F3-F4-F5. Alle Feilen sind mit einem drehzahlbegrenzten Motor mit maximal 250-300 U/min zu benutzen (VDW Silver, „Sequenz PT“; München, Deutschland).

Die Wurzelkanäle der Proben­gruppe A wurden in entsprechender Reihenfolge mit den Feilen S1, S2, F1 und F2 bis zur Größe .08/#25 aufbereitet.

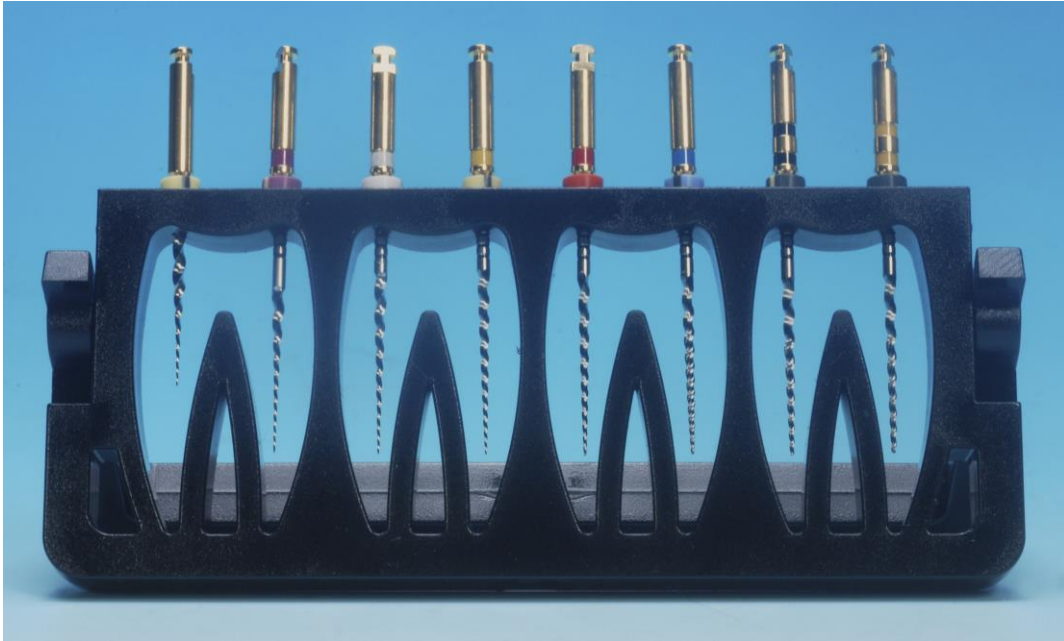


Abb.4: *Pro Taper Universal Set*

b) *WaveOne*

Die Aufbereitung der Wurzelkanäle in der Proben­gruppe B erfolgte durch das *Single-file M-Wire-NiTi-System WaveOne (DENTSPLY Maillefer)*. Die Feilen sind in den ISO-Größen 20, 25 und 40 in den Längen von 21 mm, 25 mm und 31 mm erhältlich. Sie werden mit einem vorprogrammierten Motor in einer „modifizierten Balanced force“-Bewegung verwendet.

Das *WaveOne* System besteht aus 3 unterschiedlichen Feilen:

1. *WaveOne Small File* → zur Bearbeitung enger Kanäle; an der Feilenspitze ISO-Größe 20 und einen *Taper* von 6%
2. *WaveOne Primary File* → in den meisten Kanälen anwendbar; an der Feilenspitze ISO-Größe 25, *Taper* 8%, reduziert sich zum koronalen Ende hin (Abb.5)
3. *WaveOne Large File* → in weiten Kanälen verwendet; an der Feilenspitze ISO-Größe 40, *Taper* 8%, reduziert sich zum koronalen Ende hin



Abb.5: *WaveOne Primary #25*

Sie sind zur reziproken Benutzung mit einem 6:1 reduzierten Winkelstück konzipiert. Dabei arbeiten die Feilen mit einer reversen Schneidbewegung. Die CCW-Bewegung (gegen den Uhrzeigersinn) ist größer als die CW-Bewegung (mit dem Uhrzeigersinn). Mit der CCW-Bewegung schneidet die Feile in das Dentin, die CW-Bewegung hingegen verhindert ein Festsetzen der Feile im Kanal durch das Herausdrehen der Schneiden aus dem Dentin des Kanals. Drei reziproke Zyklen entsprechen einer vollständigen reversen Rotationsbewegung. Die Instrumente haben einen modifiziert konvexen dreieckigen Querschnitt an der Spitze und am koronalen Ende.

Die Auswahl der entsprechenden Feile für einen Kanal hat nach folgender Vorgehensweise zu erfolgen:

- a) Kann eine *K-Feile* mit ISO-Größe 10 im Kanal schwierig bis auf *AL* vorgeschoben werden, ist die *WaveOne Small-File* zu verwenden.
- b) Kann eine *K-Feile* mit ISO-Größe 10 einfach auf *AL* vorgeschoben werden, ist die *WaveOne Primary-File* zu verwenden.
- c) Kann eine *K-Feile* mit ISO-Größe 20 oder größer einfach auf *AL* vorgeschoben werden, ist die *WaveOne Large-File* zu verwenden.

In stark gekrümmten Kanälen muss das apikale Drittel nach der Präparation laut dem Hersteller mit der entsprechenden Feile per Hand nachgearbeitet werden.

Die Wurzelkanäle der Gruppe B wurden in der Ein-Feilen- Technik mit reziproker Bewegung mit der *WaveOne Primary-File* bis zu der Größe von .08/#25 aufbereitet. Hierzu wurde ein drehmomentbegrenzter Motor verwendet (VDW *Silver*, Sequenz „reciprocate all“).

c) *Reciproc*

Zur Aufbereitung der Wurzelkanäle der Probengruppe C kam das *Single-File M-Wire-NiTi-System Reciproc* (VDW GmbH) zur Anwendung.

Das System besteht aus drei Instrumenten, *R25*, *R40* und *R50*. Zur Aufbereitung der Wurzelkanäle wird jeweils nur eine Feile aufbereitet. Sie haben einen S-förmigen Querschnitt und eine abnehmende Konizität (*Taper*).

Das Instrument *R25* (Abb.6) hat einen Durchmesser von 0,25 mm an seiner Spitze und einen *Taper* von 8% innerhalb der ersten drei Millimeter, ausgehend von der Instrumentenspitze.

R40 hat einen Durchmesser von 0,40 mm an der Spitze und eine Konizität von 6% ab den ersten drei Millimetern, ausgehend von der Instrumentenspitze.

R50 hat einen Durchmesser von 0,50 mm an der Spitze des Instruments und einen *Taper* von 5% innerhalb der ersten drei Millimeter, ausgehend von der Instrumentenspitze.

Die Feilen werden von einem eigenen Motor angetrieben (*VDW SILVER RECIPROC*). Die Instrumente bewegen sich in zehn reziproken Zyklen pro Sekunde, dies entspricht etwa 300 U/min. Die Rotationswerte *CW* und *CCW* sind verschieden. Rotiert das Instrument *CW*, bewegt es sich im Kanal nach apikal; bewegt es sich *CCW*, wird es gegen die Schneidrichtung bewegt.

Die Auswahl des entsprechenden *Reciproc*-Instruments wird anhand von präoperativen Röntgenbildern gemacht. Ist ein Wurzelkanal auf der Röntgenaufnahme teilweise unsichtbar, wird er als eng eingestuft. Hier wird das *R25* Instrument verwendet. Ist der Kanal auf dem Röntgenbild von apikal nach koronal gut sichtbar, wird er als mittelweit oder weit bezeichnet. In diesem Fall wird ein Handinstrument der Größe .04/#30 passiv in den Kanal eingeführt. Gelangt es passiv nicht bis auf *AL*, aber ein *ISO 20* Handinstrument kann bis auf *AL* eingebracht werden, wird die *R40* Feile zur Aufbereitung ausgewählt. Gelangt das Handinstrument Größe .04/#30 ohne Probleme bis zur *AL* in den Kanal, wird hingegen das *R50* Instrument zur Aufbereitung angewendet.

Die Kanäle sind durch die Feilen mit pickenden Bewegungen nach den Angaben des Herstellers ohne Druck bis auf *AL* aufzubereiten, wobei die pickenden Bewegungen 3-4 mm nicht überschreiten sollen.

In der Gruppe C wurden die Wurzelkanäle mittels der Ein-Feilen-Technik mit der Feile *R25* und einem drehmomentbegrenzten Motor (*VDW Silver*, Sequenz „reciprocate all“) aufbereitet.



Abb.6: Reciproc R25

d) SafeSider

Bei der Aufbereitung der Wurzelkanäle der Probengruppe D wurde das System *SafeSider* (*Loser & Co GmbH*; Leverkusen, Deutschland) verwendet. Dieses System unterscheidet sich durch mehrere Faktoren von den übrigen Systemen: Die Instrumente sind *Reamer* aus Edelstahl. Sie werden durch ein in einem 30-45-Grad-Winkel oszillierend bewegt. Dies verringert die zyklische Ermüdung der Instrumente und verhindert Torsions- &/oder Ermüdungsfrakturen. Die *Reamer* sind im Querschnitt einseitig abgeflacht sind, wodurch sich hier Debris ablagernd und aus dem Wurzelkanal abtransportiert werden kann und das Instrument einfacher zum Apex vordringen kann als *K-Feilen*. Dies ist auch darin begründet, dass diese Instrumente nur 16 Schneiden besitzen im Gegensatz zu den *NiTi*-Feilen der anderen Systeme, welche 24 Schneiden besitzen. Weiterhin treffen die Schneiden dieser *Reamer* vertikal auf die zu schneidende Oberfläche, die Schneiden der *NiTi*-Systeme treffen horizontal auf die Oberfläche. Zusätzlich sind die *Reamer* aufgrund ihrer Legierungseigenschaften weniger biegsam als *NiTi*-Instrumente. Die Feilen dieses *Single-File-Systems* sind in den Größen .06/#25, .08/#25 und .04/#30 erhältlich (Abb.8).

Für die Aufbereitung der Gruppe D wurden *Reamer* der Größe .06/#25 (Abb.7) mit dem zugehörigen *Endo-Express* (Abb.9) Winkelstück (1000 U/min bei 4-facher Übersetzung → 2500 U/min) in reziproker/oszillierender Bewegung nach Herstelleranweisung genutzt. Nach erfolgter Aufbereitung auf Arbeitslänge wurde ein *Step-back* in 1 mm-Schritten bis zur ISO-Größe 40 mit den entsprechenden *SafeSider*-Feilen durchgeführt.



Abb.7: SafeSider Feile #25



Abb.8: SafeSider Set



Abb.9: EndoExpress Winkelstück

Verwendeter Endomotor : *VDW Reciproc Silver*

Der *VDW Reciproc Silver* Endomotor (*VDW GmbH*; München, Deutschland), bestehend aus einer Steuereinheit, einem Mikromotor, einem Reduzierwinkelstück 6:1 und einem Fußschalter, wurde zur Aufbereitung der Wurzelkanäle innerhalb der Probengruppen A, B und C verwendet (Abb.10). Er besitzt eine Feilenbibliothek mit Voreinstellungen für folgende *NiTi*-Systeme:

- Reziproke Systeme →
 - WaveOne*
 - Reciproc*
- Rotierende Systeme →
 - Mtwo*
 - FlexMaster*
 - Gates-Glidden*
 - DR'S CHOICE*
 - ProTaper*
 - K3*

Die reziproken Systeme wurden in der Sequenz „*reciprocate all*“ des jeweils voreingestellten Systems verwendet. Für das System *ProTaper* wurden für die Feilen *S1*, *S2*, *F1* und *F2* voreingestellte gleichnamige Sequenzen genutzt.



Abb.10: *VDW Silver Reciproc*

4.1.2 Verwendete Spülflüssigkeiten

a) *NaOCl*

Sowohl zur Anfeuchtung der Kanäle während der Aufbereitung, als Zwischen-spülung sowie auch als ein Bestandteil der Abschlusspülung nach erfolgter Aufbereitung wurde Natriumhypochlorit eingesetzt. Es ist als 5,25% (M/M) Dentallösung erhältlich (*Speiko; Dr. Speier GmbH*) und wurde im Verhältnis 1:2 mit *Aqua bidest.* zu einer Endkonzentration von 2,625 % (M/M) verdünnt.

b) *EDTA*

Das zur Abschlusspülung verwendete Ethylendiamintetraacetat wurde nach einer Rezeptur von Professor Kim der Universität Pennsylvania hergestellt. Die folgende Rezeptur ergibt eine 15% *EDTA*-Lösung mit einem *pH*-Wert von 7,5-8 :

- 800 ml *Aqua bidest.*
- 186 g Di-Natriumethylendiamintetraacetat (*DEDTA*)
- 20 g Natriumhydroxid

4.1.3 Digitales Röntgensystem

Digora-System

Das digitale Röntgensystem *Digora* (*Soredex Germany; Schutterwald, Deutschland*) beinhaltet die Verarbeitung und Auswertung mittels entsprechender Software. Zur Anfertigung der Röntgenaufnahmen stehen Speicherfolien verschiedener Größen zur Verfügung:

- 0 ➔ 22 x 31 mm; 628 x 885 Pixels; 1,08 MB
- 1 ➔ 24 x 40 mm; 685 x 1143 Pixels; 1,52 MB
- 2 ➔ 31 x 41 mm; 886 x 1171 Pixels; 2,03 MB
- 3 ➔ 27 x 54 mm; 771 x 1542 Pixels; 2,32 MB

Die Silberstiftaufnahmen und die Masterpointaufnahmen der Probengruppen A, B, C und D wurden mit einer Speicherfolie der Größe 3 angefertigt. Die Kalibrierung der Silberstiftaufnahme zur Festlegung der Arbeitslänge fand anhand der Verarbeitungssoftware *Digora* am *PC* statt.

4.1.3.1 Auswahl des Auswertungsverfahrens der Röntgenbilder

Um die Veränderung der Wurzelkanalanatomie durch die Aufbereitung darstellen zu können, kam ein Verfahren zur Anwendung:

1. Softwaregestützte Auswertung

Die computergestützte Auswertung erfolgte unter Zuhilfenahme des *Digora*-Röntgensystems. Mit den entsprechenden Tools wurden 2 Geraden eingezeichnet:

- Gerade a` durch die lange Achse des *WK* von koronal
- Gerade b` ausgehend vom Foramen apikale

Der Schnittpunkt der Geraden A` und B` beschrieb den Punkt im Verlauf des *WK*, an dem der Verlauf des Kanals die lange Achse des Zahnes aufgrund der Wurzelkanalkrümmung verlässt (Abb.11; Abb.12).

Der zwischen den Geraden entstandene spitze Winkel legte die Krümmung des *WK* fest (*Methode nach Schneider 1971*).

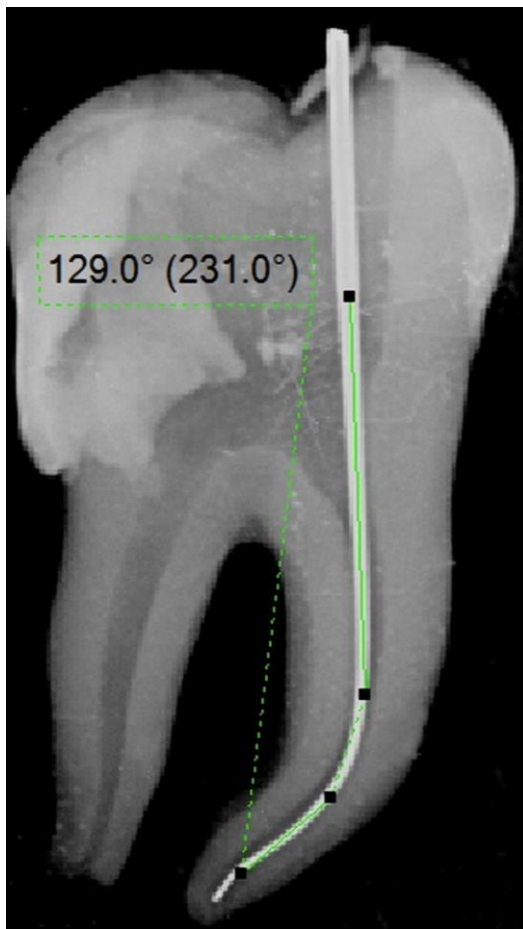


Abb.11: Prä-OP mit Silberstift mit Darstellung des Krümmungswinkels

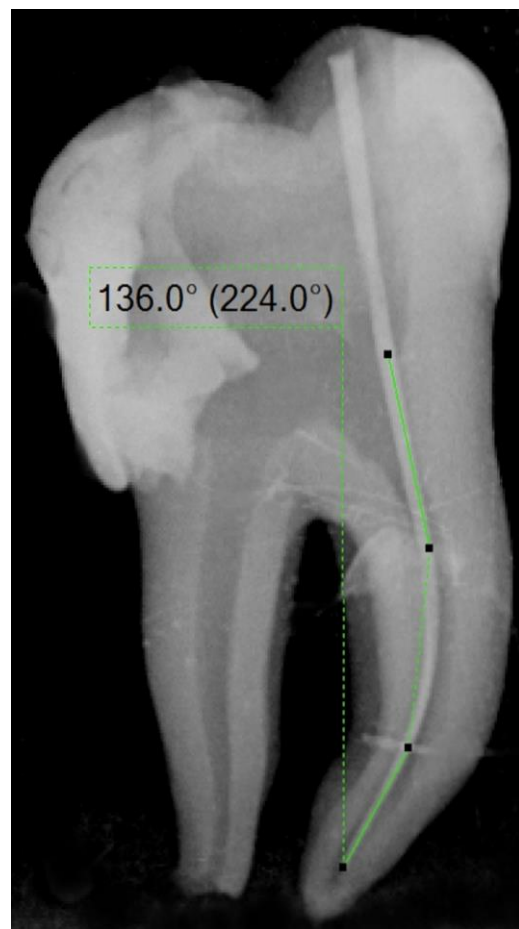


Abb.12: Post-OP mit Guttaperchastift mit Darstellung des Krümmungswinkels (Aufbereitung mit *Reciproc*-System)

4.1.4 Rasterelektronenmikroskop

FEI Phenom

Die hier beschriebene Betrachtung der in Längsrichtung zum Verlauf der Krümmung zerteilten Zahnhälften erfolgte im *FEI Phenom* (*Phenom-World BV*; Eindhoven, Niederlande) auf Probenträgern der Größe 25mm x 30mm (Abb.13). Je nach Größe der Zahnhälften wurden die Zahnhälften einzeln oder paarweise auf den Probenträgern mit *Leit-C-Plast # 12667* befestigt (*Plano GmbH*; Wetzlar, Deutschland). Sie wurden in einem Probenhalter in das Rasterelektronenmikroskop eingebracht. Zunächst wurde eine Übersichtsaufnahme der Probe im lichtmikroskopischen Modus (20-120fache Vergrößerung) erstellt.

Daraufhin wurden unter Vakuum an den zuvor markierten Punkten (1 mm, 3 mm, 6 mm und 9 mm vom Apex nach koronal) jeweils zwei Aufnahmen pro Probe erstellt:

1. Topographie A: 300-500 x Vergrößerung
2. Topographie B: 850-1000 x Vergrößerung

Topographie A diente zur Darstellung von Vertiefungen im Bereich des Wurzelkanals, welche durch die Aufbereitung verursacht wurden, sowie zur Beurteilung von verbliebenem Debris. Topographie B diente zur Darstellung der angeschnittenen Dentinkanälchen und auch von verbliebenem Debris.

Weiterhin wurden jeweils Übersichtsaufnahmen der einzelnen Abschnitte (1-3 mm, 3-6 mm und 6-9 mm vom Apex nach koronal) zur Darlegung der Entscheidungsfindung bezüglich der Betrachtung der Zahnhälften bei einer Vergrößerung von 350-400 μm erstellt.

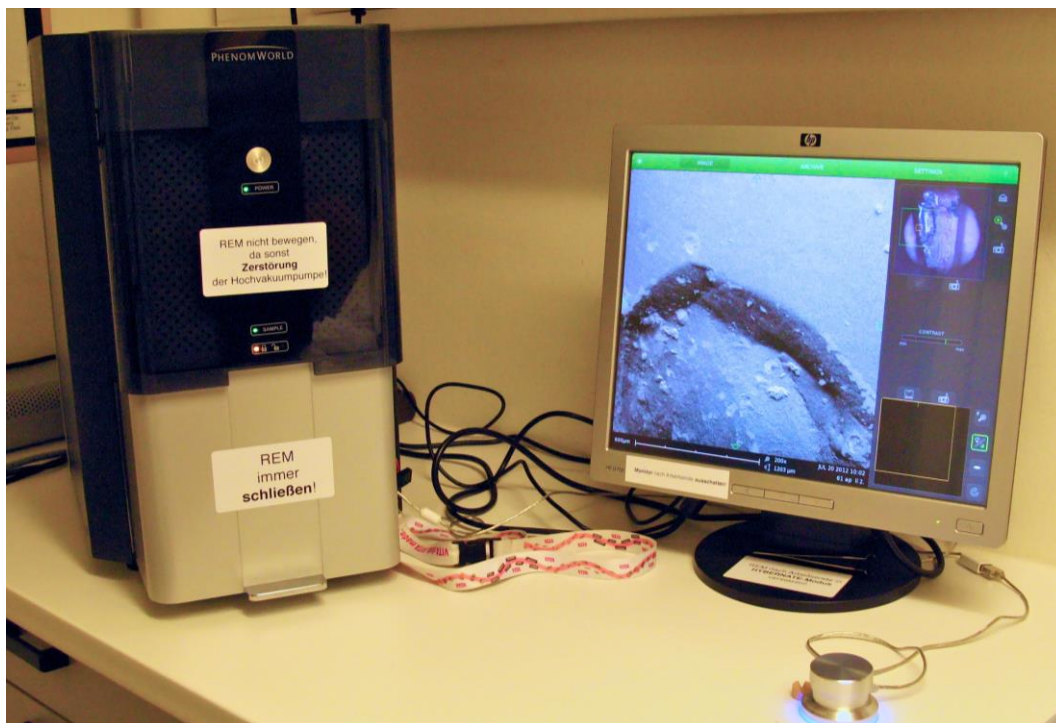


Abb.13: Rasterelektronenmikroskop FEI Phenom

5 Ergebnisse

Die statistische Auswertung der erhobenen Rohdaten zu den angefertigten Röntgenbildern sowie der Zeiten, welche während der Aufbereitung gemessen wurden, wurde anhand verschiedener statistischer Tests durchgeführt:

1. *OneWay ANOVA*
2. *OneWay ANOVA deskriptive Statistiken*
3. *Chi-Quadrat Test*
4. *Tamhane-Test*
5. *Welch-Test/ Brown-Test (auf Gleichheit der Mittelwerte)*
6. *Tukey-Test*
7. *Dunnnett T3 Test*
8. *Student Newman-Keuls-Prozedur a, b*

Die Ergebnisse der Mittelwertanalyse wurden durch Säulendiagramme dargestellt, wobei die verschiedenen Aufbereitungssysteme wie folgend farblich codiert wurden:

<i>ProTaper</i>	rot
<i>WaveOne</i>	blau
<i>Reciproc</i>	gelb
<i>SafeSider</i>	grün

Zusätzlich wurden die Bilder, welche unter dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen und nach dem Scoring- System bewertet wurden, in Kreuztabellen und durch den *Chi-Quadrat*-Test beurteilt. Dabei wurden der Smear layer, der Debris und die Kanalwandbeschaffenheit in drei Bereichen untersucht (apikal, medial, koronal). Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte ebenfalls in Säulendiagrammen.

5.1 Varianzanalyse und Gleichheit der Mittelwerte

Das *OneWay ANOVA* Testverfahren zeigte signifikante Unterschiede zwischen den vier verschiedenen Aufbereitungssystemen bezüglich der alleinigen Aufbereitungsdauer, der Spülzeit, der Trocknungszeit, der Aufbereitungszeit im Gesamten und der Differenz der Krümmungswinkel der Wurzelkanäle vor und nach der Aufbereitung nach manueller Auswertung ($p < 0,05$).

Weiterhin zeigten auch robuste Testverfahren zur Gleichheit der Mittelwerte, der *Welch-Test* und der *Brown-Forsythe-Test*, signifikante Unterschiede zwischen den vier Instrumentengruppen ($p < 0,05$) hinsichtlich der genannten Kriterien.

5.2 Ergebnisse zur Aufbereitungsdauer

Den deskriptiven statistischen Untersuchungen zufolge war im Mittel die Aufbereitungsdauer separat betrachtet für das System *SafeSider* am höchsten ($\bar{x} = 219,78$ sek.) mit einer Standardabweichung von 76,704 (Abb.14). Die *Post-hoc*-Tests nach *Tamhane*, *Tukey* und *Dunnett T3* zeigten, dass zwischen den Systemen *ProTaper*, *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider* signifikante Unterschiede bezüglich der Dauer der Aufbereitung bestanden. Der Student-Keuls-Newman-Test konnte zeigen, dass die Feilensysteme *ProTaper*, *WaveOne* und *Reciproc* hierbei in ihren Ergebnissen eine homogene Einheit bildeten und nur das System *SafeSider* von dieser Untergruppe nicht signifikant abwich ($p = 0,149$).

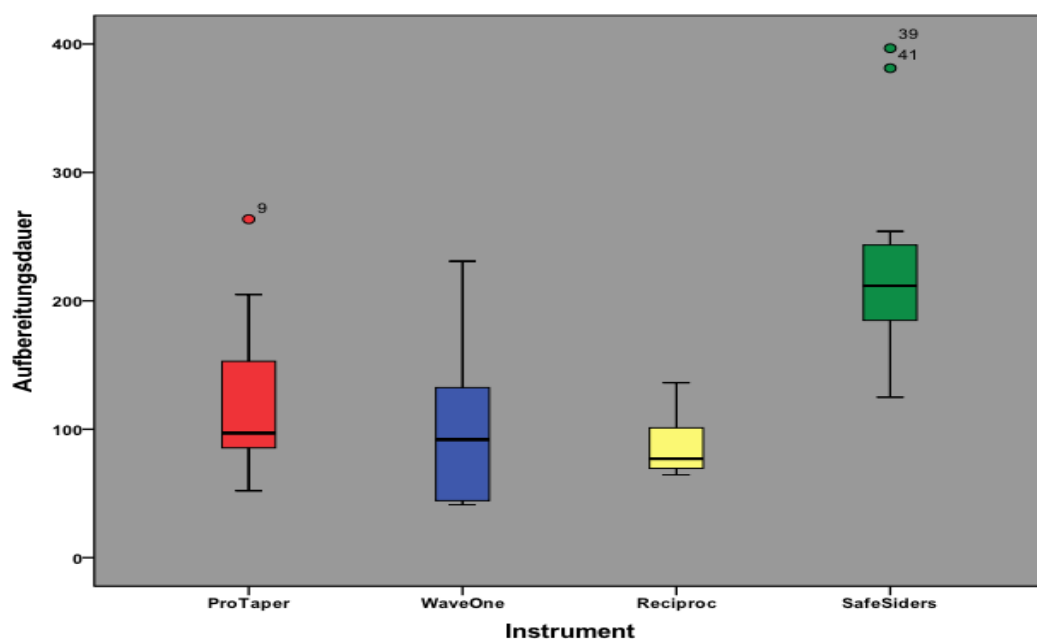


Abb.14: Mittelwerte der Aufbereitungszeiten

5.3 Ergebnisse zur Spülzeit

Bei der Berechnung der Mittelwerte für die Spülzeit wurde deutlich, dass bei Anwendung des *ProTaper*-Systems die längste Spülzeit ($\bar{x}=189,72$ sek.) im Vergleich zu den Mittelwerten der drei weiteren Systemen auftrat. Zusätzlich konnte für das System *Reciproc* die mit Abstand kürzeste benötigte Spüldauer ($\bar{x}=129,84$ sek.) ermittelt werden (Abb.15).

Die Testverfahren nach *Tamhane*, *Dunett T3* und *Tukey* belegten signifikante Unterschiede in der Spüldauer zwischen den verschiedenen Systemen ($p<0,05$). Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass das System *Reciproc* und *SafeSider* in ihren Ergebnissen eine homogene Untergruppe bildeten. Die Systeme *WaveOne* und *ProTaper* wichen von dieser homogenen Untergruppe ab, waren inhomogen zueinander, differierten aber nicht signifikant ($p=0,63$).

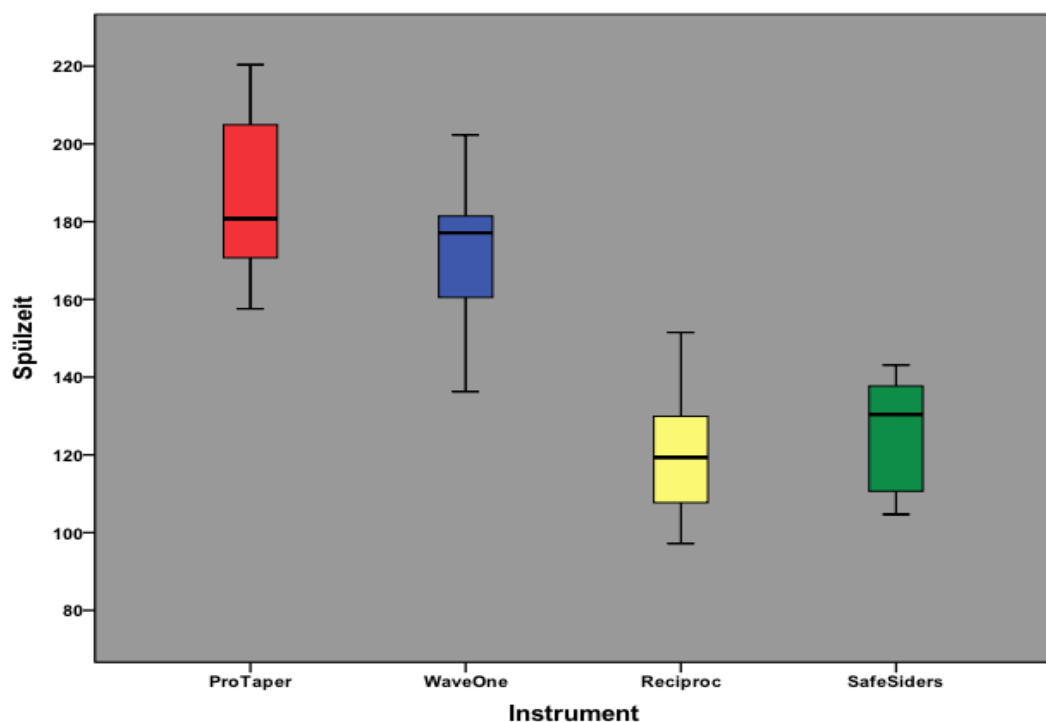


Abb.15: Mittelwerte der Spülzeiten

5.4 Ergebnisse zur Trocknungszeit

Zur Trocknung des aufbereiteten Wurzelkanals wurde nach Anwendung mit den *Reciproc*-Feilen am meisten Zeit benötigt ($\bar{x}=65,87$), für das System *SafeSider* hingegen wurde die geringste Trocknungsdauer aufgewendet ($\bar{x}=37,57$) (Abb.16). Unter Verwendung der *Post-hoc*-Testverfahren wurden signifikante Unterschiede der Werte des *SafeSider*-Systems zu den übrigen drei Feilensystemen bezüglich der Trocknungszeit nachgewiesen ($p<0,05$).

Weiterhin bildeten die erhobenen Werte des Systems *WaveOne* mit den Werten der Systeme *ProTaper* und *Reciproc* nach dem *Student-Newman-Keuls*-Testverfahren homogene Untergruppen, wobei die Werte von *ProTaper* und *Reciproc* untereinander aber nicht homogen waren. Das System *SafeSider* war zu allen drei weiteren Systemen inhomogen und bildete eine eigene Untergruppe.

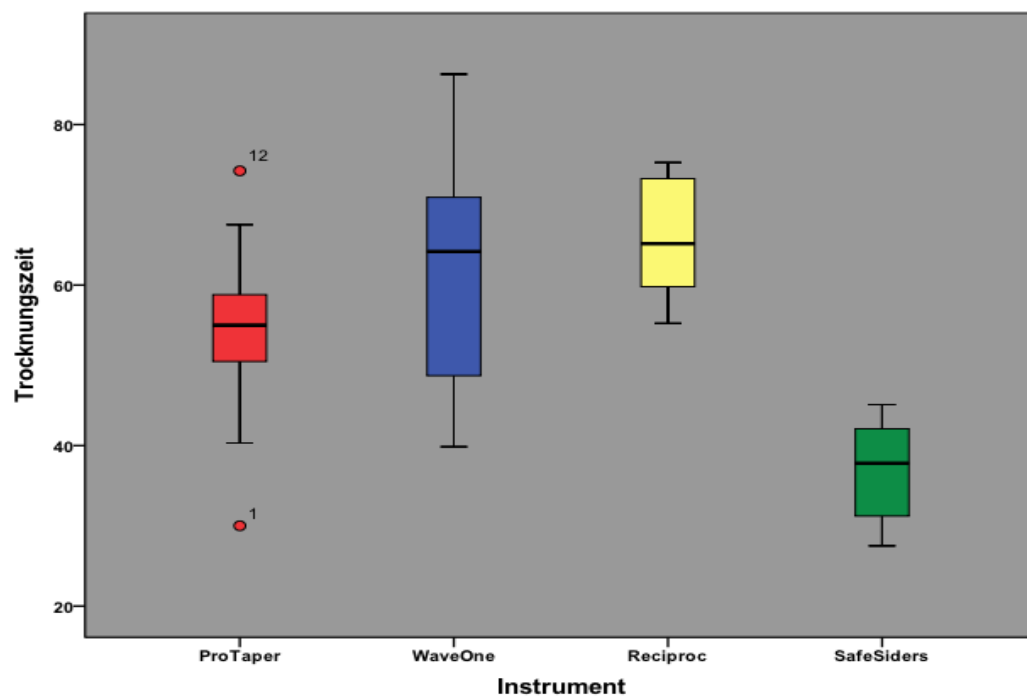


Abb.16: Mittelwerte für die Trocknungszeit

5.5 Ergebnisse zur Gesamtaufbereitungszeit

Die längste Aufbereitungszeit insgesamt, dass bedeutet die alleinige Aufbereitungszeit pro System, addiert zu der Spülzeit und der Trocknungszeit, konnte im Mittel für das System *SafeSider* festgestellt werden ($\bar{x}=416,42$ sek.), die kürzeste Zeit insgesamt wurde für die *Reciproc*-Feilen ($\bar{x}=268,31$ sek.) ermittelt (Abb.17).

Im Folgenden wurden durch den *Tamhane-Test*, den *Tukey-Test* und den *Dunnett-T3-Test* signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen veranschaulicht ($p<0,05$).

Die Messwerte der Systeme *ProTaper*, *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider* bildeten keine homogenen Untergruppen miteinander und waren daher untereinander vollständig inhomogen.

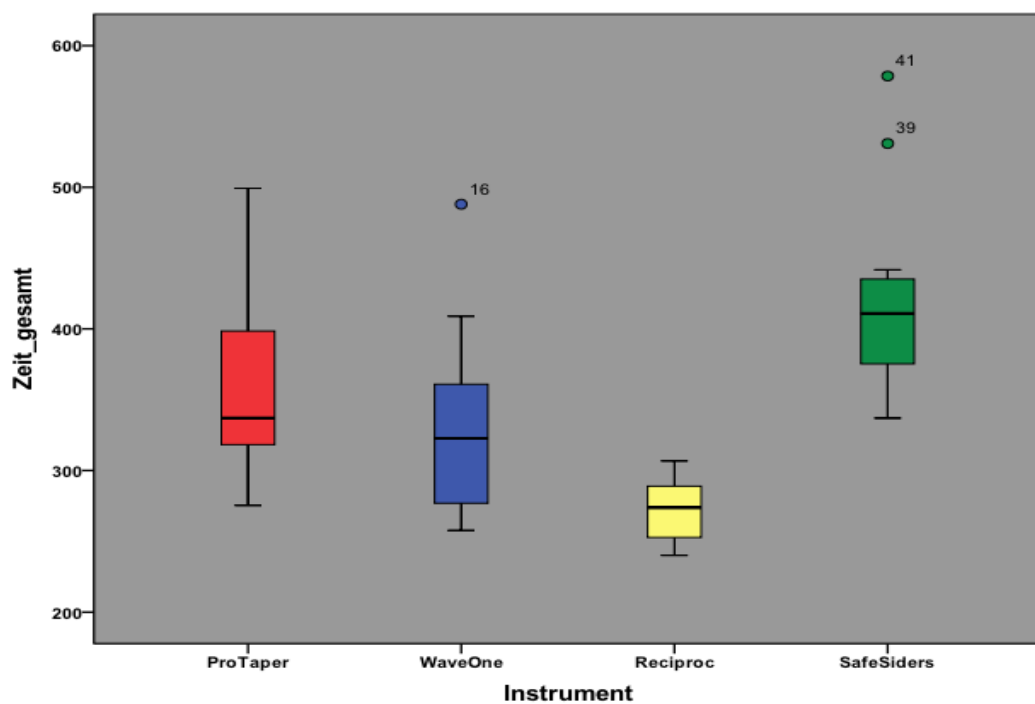


Abb.17: Mittelwerte der Aufbereitungszeit insgesamt

5.6 Ergebnisse zu der Differenz der Krümmungswinkel vor und nach der Aufbereitung (computergestützte Auswertung)

Die Ergebnisse für die Differenz der Krümmungswinkel vor und nach der Aufbereitung durch die vier Systeme anhand der computergestützten Auswertung waren für jedes einzelne System breit gefächert. Bezüglich der Mittelwerte zeigte das System *WaveOne* die größte Abweichung der Krümmung der Kanäle (Abb.18).

Die *Post-hoc*-Tests ergaben keine signifikanten Unterschiede der Ergebnisse der vier Systeme. Weiterhin waren die vier Gruppen in ihren Ergebnissen homogen zueinander.

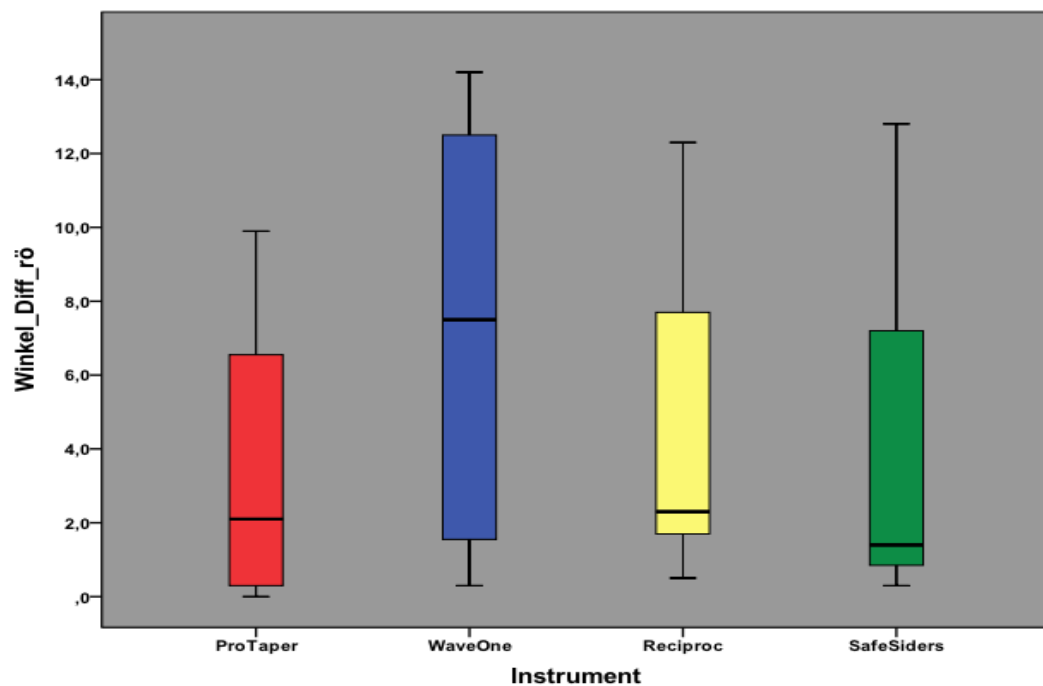


Abb.18: Mittelwerte der Differenz der Krümmungswinkel prä- und postoperativ nach computergestützter Auswertung

5.7 Ergebnisse zum Debris

Im Zuge der Bewertung des Debris wurde festgestellt, dass die Systeme *ProTaper* und *WaveOne* für den apikalen Wurzelkanalabschnitt im Score-System vermehrt im Wertbereich 1 zu finden waren. Das Debridement durch das *SafeSider*-System wurde nahezu ausschließlich mit Score 3 bewertet. Weiterhin lag die Bewertung des *Reciproc*-Systems gehäuft im Bereich des Scores 4. Es konnten signifikante Unterschiede bei der Auswertung der einzelnen Systeme ausgewiesen werden ($p < 0,05$) (Abb.19). Im medialen Wurzelkanalbereich lagen ähnliche Ergebnisse wie im apikalen Bereich vor. Wiederum wurde das *ProTaper*-System und das *WaveOne*-System bezüglich der Debridement hauptsächlich mit Score 1 bewertet und das *SafeSider*-System lag vornehmlich im Bereich des Scores 3. Die Auswertung der *Reciproc*-Proben hingegen zeigte eine breit gefächerte Wertungsverteilung über die 5 Scores, hierbei wurden die Proben in 6 von fünfzehn Fällen im Bereich des Scores 3 gewertet. Es bestanden signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen ($p < 0,05$).

Die Verteilung änderte sich nach koronal hin nur geringfügig. Auch hier war das *ProTaper*-System und das *WaveOne*-System fast ausschließlich im Bereich von Score 1 vorzufinden und die *SafeSider*-Proben im Bereich des Scores 3. Die Werte für das *Reciproc*-System waren hier gleichmäßig auf alle Scoring-Werte verteilt mit einer leichten Prävalenz des Scores 3. Ebenfalls wurden im koronalen Auswertungsabschnitt signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) für die Proben der 4 Systeme bestätigt.

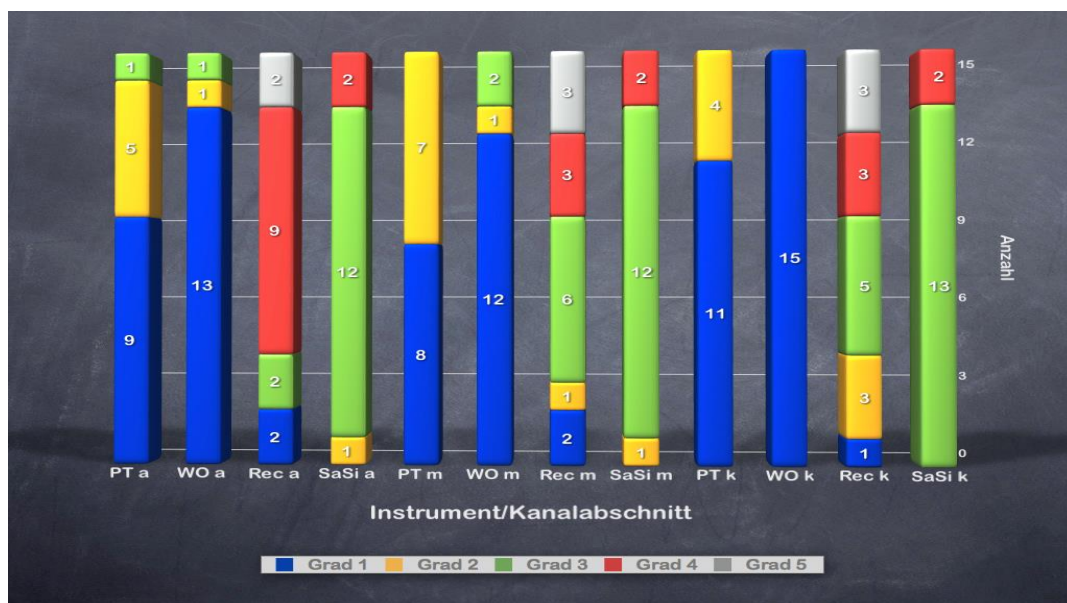


Abb.19: Debris apikal, medial, koronal; Bewertung nach Score-System; Verteilung der Werte.

5.8 Ergebnisse zum Smear layer

Bei der statistischen Auswertung der nach dem Score-System ermittelten Werte bezüglich des Smear layers zeigte sich, dass die Bewertung des SL im apikalen Wurzelkanalabschnitt für das System *WaveOne* am häufigsten im Score-Bereich 1 zu finden war, die Werte für *ProTaper* zu gleichen Teilen im Scoring-Bereich 1 und 2 lagen und die Scoring-Beurteilung für die Systeme *SafeSider* und *Reciproc* vornehmlich im Bereich des Score 3 rangierten. Dabei waren signifikante Unterschiede zwischen den Feilensystemen ermittelbar ($p < 0,05$) (Abb.20).

Im mittleren Wurzelkanalabschnitt fanden sich sowohl die *ProTaper*-, als auch die *WaveOne*-Feilen hauptsächlich im Bereich des Score 1, die Systeme *Reciproc* und *SafeSider* lagen im Score-Bereich 3. Auch hier konnten signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen belegt werden ($p < 0,05$).

Die Beurteilung des koronalen Drittels zeigte nur geringe Abweichungen zu der Analyse der Werte im mittleren Wurzelbereich. Die Werte von *ProTaper* und *WaveOne* lagen gleichermaßen im Scoring verteilt vermehrt im Score-Bereich 1, das *SafeSider*-System deutlich bei Score 3 und ebenso die Werte für das *Reciproc*-System für 7 von 15 untersuchten Proben bei Score 3. Die restlichen untersuchten Proben der *Reciproc*-Gruppe verteilten sich zu gleichen Teilen auf die Scores 1-5. Die Unterschiede zwischen den Systemen waren signifikant ($p < 0,05$).

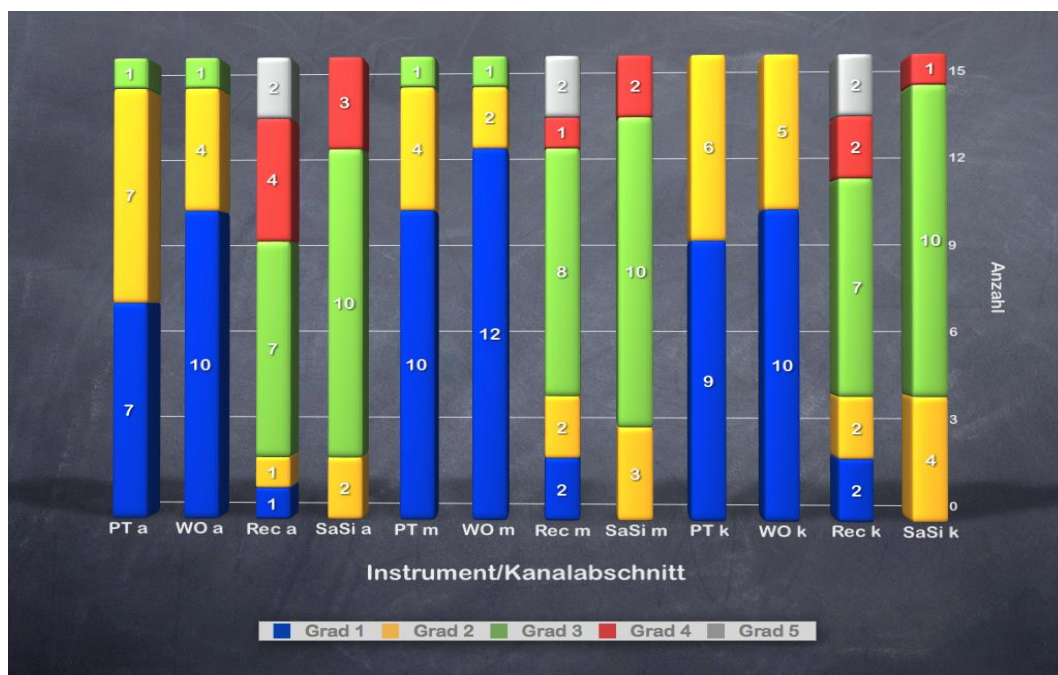


Abb.20: Smear layer apikal, medial, koronal; Bewertung im Score-System; Verteilung der Werte

5.9 Ergebnisse zur Kanalwandbeschaffenheit

Die Kanalwandbeschaffenheit wurde im koronalen, medialen und apikalen Bereich bewertet. Dabei lagen die Systeme *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider* im apikalen Wurzelkanalbereich vornehmlich im Bereich des Scores 2, wohingegen die Bewertung für das *ProTaper*-System über alle Scores verteilt vorlag. Es gab signifikante Unterschiede zwischen den Probengruppen ($p < 0,05$) (Abb.21).

Im medialen und auch im koronalen Bereich lagen die Werte für alle 4 Systeme gehäuft bei Score 2. Dabei ergaben sich sowohl im medialen, als auch im koronalen Bereich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p < 0,05$).

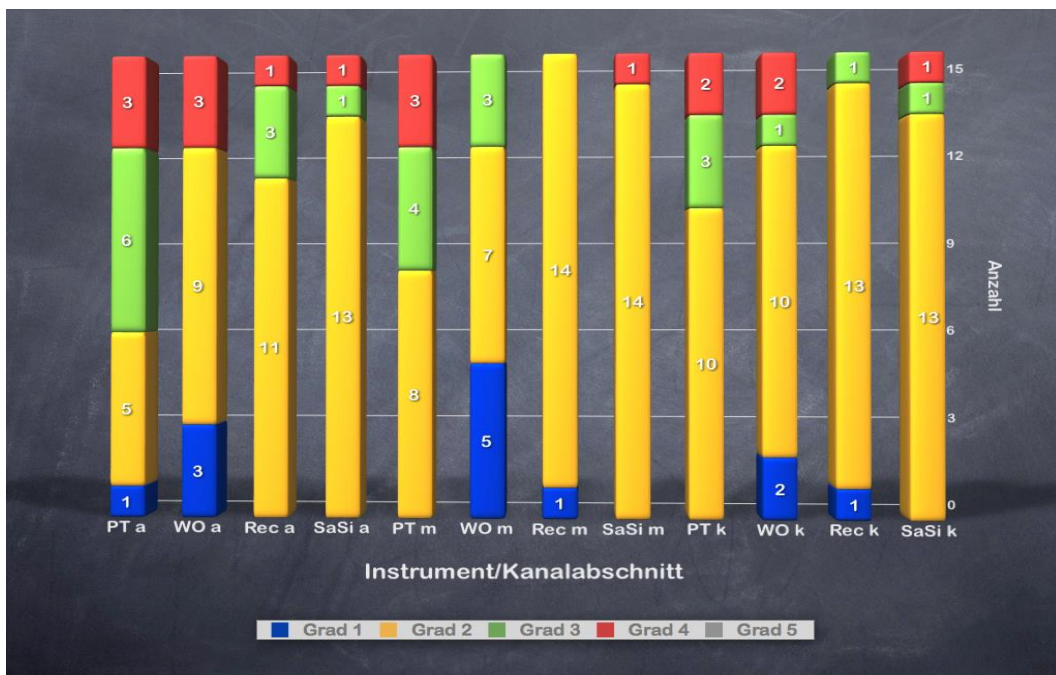


Abb.21: Kanalwandbeschaffenheit apikal, medial, koronal nach Score-System; Verteilung der Werte

6 Diskussion

6.1 Standardisierung und Vergleichbarkeit der Methodik

Im Rahmen dieser *In-vitro*-Studie wurden die Reinigungseigenschaften bezüglich Smear layer, Debris und der Kanalwandbeschaffenheit von vier unterschiedlichen maschinellen Aufbereitungssystemen in gekrümmten Wurzelkanälen untersucht, wobei auch ihre Auswirkungen auf die Wurzelkanalanatomie und der zeitliche Aufwand für die Aufbereitung betrachtet wurden.

Um eine möglichst hohe Standardisierung zu erzielen, wurde die Studie nach wissenschaftlich bewährten Standards vorbereitet und durchgeführt, sodass störende oder beeinflussende Elemente weitestgehend ausgeschlossen wurden.

Die extrahierten Zähne wurden vor ihrer Trepanation visuell beurteilt und ausschließlich solche Zähne, die nach optischer Betrachtung eine Kanalkrümmung besaßen, verwendet. Hierbei wurden sowohl Zähne mit einfacher als auch mit doppelter Wurzelkrümmung ausgewählt. Durch die Trepanation wurde stets ein gradliniger Zugang zu den Wurzelkanälen sowohl für die *C-Pilot*, die *K-Feilen* als auch die maschinellen Wurzelkanalinstrumente geschaffen. Es wurden sowohl Zähne mit engen und runden, sowie auch mit weiten und ovalen Kanälen verwendet. Anhand der *C-Pilot* Feilen und der *K-Feilen* wurde ein Gleitpfad bis auf Arbeitslänge geschaffen. Dies ist laut Herstellerangaben zur Vorbereitung auf die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung wünschenswert (Berutti et al. 2012).

Nach der Trepanation und initialen Sondierung erfolgte eine Röntgenaufnahme der Zähne mit Silberstiften, um den Grad der Kanalkrümmung röntgenologisch darzustellen, beurteilen und auswerten zu können. Dazu wurden die Zähne in einem Plexiglaskästchen befestigt. Eine exakte Repositionierung der Zähne wurde durch eine Markierung mit Composite gewährleistet, wodurch eine Veränderung der Darstellung der Kanalkrümmung verhindert wurde.

Die Wurzelkanalaufbereitung erfolgte entsprechend der Herstellerangaben mit dem gleichen drehmomentbegrenzten Endomotor für die Systeme *ProTaper*, *WaveOne* und *Reciproc*. Nur die Feilen des Systems *SafeSide* wurden mit einem eigenen Winkelstück (*Endo Express*) drehmomentbegrenzt angetrieben.

Die Zwischenspülungen während der Aufbereitung erfolgten nach jeder Feile mit jeweils 0,1 ml *NaOCl*. Zur abschließenden Spülung der Kanäle nach der Aufbereitung wurde ebenfalls für jeden Kanal die identische Menge an Spülflüssigkeit aufgewendet (3 ml *NaOCl*, 3 ml *EDTA*, 3 ml *H₂O*). Des Weiteren wurden zur Trocknung der Kanäle einheitliche Papierspitzen verwendet.

Die Zähne wurden unter gleichartigen Bedingungen entlang der Längsachse der Krümmung der Wurzelkanäle mit einer Trennscheibe geteilt und auf den Probenträgern für das Rasterelektronenmikroskop befestigt. Die Betrachtung der Wurzelkanäle erfolgte in zuvor festgelegten einheitlichen Vergrößerungsbereichen.

6.2 Bewertung der Ergebnisse

6.2.1 Aufbereitungszeit

Die Aufbereitungszeit war sowohl einzeln als auch insgesamt in Addition mit der Trocknungs- und Spülzeit für das System *SafeSider* länger als für die Systeme *ProTaper*, *WaveOne* und *Reciproc*.

Der wesentliche Aspekt, der zur signifikant längeren Aufbereitungszeit mit dem *SafeSider*-System geführt hat, dürfte in der Anzahl der Feilen und der systembedingt durchzuführenden Step-back-Technik in Kombination mit der oszillierenden Bewegung der Instrumente begründet sein. Vollrotierende Systeme verfügen über eine bessere Schneideffizienz und den archimedischen Schraubeneffekt, welcher zu einem deutlich höheren Dentinabtrag führt. Auch die Schneidengeometrie der reziproken Systeme vollzieht im praktischen Einsatz in der Summe eine Vollrotation, wodurch auch hier in Kombination mit dem durchgehenden Schneidenverlauf ein effektiverer Dentinabtrag erfolgen kann und die Instrumentierungszeit reduziert wird.

Auch lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schneiden und der Länge der Aufbereitungszeit erkennen. Im Gegensatz zu den drei übrigen Systemen, deren Feilen alle 24 Schneiden besitzen, weisen die Instrumente des Systems *SafeSider* nur 16 Schneiden im Arbeitsteil auf, so dass dieses System prinzipiell einem K-Räumer entspricht (Wan et al. 2010).

Dies bewirkt zwar einen geringeren Widerstand der Feile im Kanal und somit eine geringe Frakturgefahr, aber erschwert auch das Vordringen des Instruments bis auf Arbeitslänge, besonders in stark gekrümmten Kanälen (Wan et al. 2011).

Studien im Jahre 1999 und 2008 zeigten, dass die Edelstahllegierung im Vergleich zu der Nickel-Titan-Legierung eine größere Oberflächenhärte besitzt (Schäfer et al. 1999, Schäfer et al. 2008). Dies führt zu einer Erhöhung der

Schneidleistung der Feilen. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass dieser Einflussfaktor auf die Schneidleistung für das *SafeSider*-Aufbereitungssystem aber nicht ausreichend groß ist, um eine tatsächliche Verringerung der Aufbereitungsdauer herbeizuführen und die Erniedrigung der Schneidleistung durch die Reduzierung der Anzahl der Schnitten auszugleichen. Auch wird deutlich, dass die einseitig unterbrochene Schneide der *SafeSider*-Instrumente die Aufbereitungszeit erhöht, da mit Systemen, welche ebenfalls *Single-file* Systeme sind aber über durchgehend verlaufende Schneidenden im Arbeitsteil verfügen, eine wesentlich geringere Aufbereitungsdauer notwendig ist, um die Wurzelkanäle bis auf AL zu bearbeiten. Somit stellt die unterbrochene Schneide einen gewissen Nachteil hinsichtlich der Schneideffizienz dar.

Des Weiteren ist eine Auswirkung der Antriebsart auf die Aufbereitungsdauer zu erkennen. Im Gegensatz zu den drei anderen Systemen, welche entweder reziprok (90° Bewegungsradius) oder vollrotierend (360° Bewegungsradius) arbeiten, ist die Bewegung der *SafeSider*-Feilen auf 30°-45° begrenzt (oszillierendes Bewegungsmuster). Die Anzahl der Umdrehungen pro Minute für dieses System ist gegenüber den anderen Systemen stark erhöht (*SafeSider* 2200- 3500 U/min; *ProTaper*, *Reciproc* und *WaveOne* 250- 350 U/min), womit der geringere Abtrag aufgrund der oszillierenden Bewegungen laut Herstellerangaben ausgeglichen werden soll. Dies kann in dieser Studie nicht bestätigt werden. Dadurch wird ersichtlich, dass eine erhöhte Umdrehungszahl eine Verringerung der Schnitten und der Schneidfläche nicht kompensieren kann.

Die Länge der alleinigen Aufbereitungsdauer des Systems *ProTaper* begründet sich auf einen höheren Zeitbedarf als für die *Single-file*-Systeme, da im Gegensatz zu diesen hier insgesamt 5 Feilen zur Aufbereitung eines Wurzelkanals angewendet wurden. Dabei erzeugt schon der Austausch der Feilen während der Aufbereitung einen höheren Zeitaufwand. Weiterhin erhöhte sich durch die Anzahl der angewendeten Feilen folglich auch die Anzahl der Zwischenspülungen während der Aufbereitung, was sich in den Ergebnissen der Spülzeiten insgesamt widerspiegelt. Dies ist als Begründung für die Länge der gesamten Aufbereitungsdauer der *ProTaper*-Feilen zu werten, welche gegenüber den Systemen *WaveOne* und *Reciproc* erhöht war.

Die Systeme *WaveOne* und *Reciproc* benötigten für die alleinige Aufbereitungszeit, wie auch für die Aufbereitungszeit insgesamt die kürzeste Zeitspanne, wobei das System *Reciproc* dem System *WaveOne* geringfügig überlegen war. Diese Aussage wird unterstützt durch die Ergebnisse einer ähnlichen Studie, in welcher ebenfalls die Systeme *ProTaper*, *WaveOne* und *Reciproc* direkt miteinander

verglichen wurden. Dabei war das System *Reciproc* den weiteren Systemen bezüglich der Aufbereitungszeit signifikant ($p < 0,05$) überlegen (Bürklein et al. 2012).

Weiterhin nutzen beide Systeme einen reziproken Antrieb, sind *Single-file* Systeme und bereiteten die Wurzelkanäle bis zu einer *ISO*-Größe von .08/#25 auf, sodass die Bedingungen für die Aufbereitung durch die beiden Systeme nahezu identisch waren. Das Ergebnis für das *Reciproc*-System deutet darauf hin, dass ein Doppel-S-förmiger Querschnitt des Arbeitsteils bei reziprok angetriebenen Wurzelkanalinstrumenten eine Alternative oder Verbesserung gegenüber dem klassischen dreieckigen Querschnitt der konventionellen maschinellen Nickel-Titan-Instrumente darstellt.

Die markante Differenz der Trocknungsdauer der anhand der *SafeSider*-Feilen aufbereiteten Wurzelkanäle gegenüber den übrigen Aufbereitungssystemen ist in diesem Ausmaß nicht zu erklären.

6.2.2 Kanalwandbegradigung

Die computergestützte Auswertung der Röntgenbilder vor und nach der Aufbereitung zeigten für die *ProTaper*-, *SafeSider*- und die *Reciproc*-Feilen ähnliche Ergebnisse. Einzig die Bewertung für das System *WaveOne* differierte stark.

Die *ProTaper*-Feilen zeigten in früheren Studien im direkten Vergleich mit Edelstahlfeilen, manuell oder vollrotierend angewendet, eine gleichwertige Kanalwandbegradigung (Hartmann et al. 2007).

Daher erklärt sich das vorliegende Ergebnis nicht durch einen Unterschied in den Legierungen der Feilen, sondern durch die flexibleren Beurteilungs- und Darstellungsmöglichkeiten mittels der manuellen Auswertung anhand von Geometriedreieck und Zirkel, da sich auf den vergrößerten Ausdrucken der Röntgenbilder zeichnerische Abweichungen leicht ergeben können. Am Computer ist dies nicht gegeben aufgrund der Vorgaben des Programms *Digora*, mit welchem die Röntgenbilder ausgewertet und bearbeitet wurden.

In einer vergleichenden Arbeit bezüglich der Systeme *ProTaper* und *WaveOne* wurde dargestellt, dass die Wahl des Instruments entscheidend für die Krümmungsveränderungen nach der Instrumentierung eines Wurzelkanals ist. Hier wurde eine geringere Kanalwandveränderung nach Anwendung der *WaveOne Primary-File* unter reziprokem Antrieb erzielt (Kim et al. 2012). Dies

wird durch die Ergebnisse der computergestützten Auswertung der Röntgenbilder in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt, da die Feilen des Systems *ProTaper* denen des Systems *WaveOne* in der Krümmungsveränderung überlegen sind.

In ovalen Wurzelkanälen konnte für das neuartige Aufbereitungssystem *SafeSider* eine geringere Begradigung des ursprünglichen Kanalverlaufs ermittelt werden als für Feilen des *ProTaper* Systems (Hilaly Eid & Wanees Amin 2011). Dies ist nach Auswertung der Ergebnisse nicht auf enge, runde, stark gekrümmte Wurzelkanäle übertragbar.

Somit kann nach dieser Untersuchung festgestellt werden, dass bezüglich der Kanalwandbegradigung, der computergestützten Auswertung folgend, das vollrotierende *ProTaper*-System den *Single-file*-Systemen *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider* nicht signifikant überlegen ist ($p > 0,05$).

6.2.3 Debris

Die Auswertung der *REM*-Bilder unterschiedlicher Vergrößerungsmodi zeigte eindeutige Resultate hinsichtlich der Entfernung des Debris aus den Wurzelkanälen. In allen 3 Kanalabschnitten zeigte sich nach Anwendung der Systeme *ProTaper* und *WaveOne* die effektivste Säuberung der Wurzelkanaloberfläche von Debris. Dies konnte unter vergleichbaren Aufbereitungsbedingungen für *ProTaper* schon in der Vergangenheit dargestellt werden (You et al. 2011; Paqué et al. 2005).

Die Bearbeitung der Kanalwände mit den Feilen der Systeme *SafeSider* und *Reciproc* erzeugt eine große Menge Debris (Wan et al. 2010; Bürklein et al. 2012), welcher, wie in der Score-Auswertung ersichtlich ist, durch die chemo-mechanische Aufbereitung nicht suffizient beseitigt werden kann. Allerdings liegen hierzu keine weiteren vergleichenden Studien mit vollrotierenden Aufbereitungssystemen vor. Dennoch ist eine erhöhte Debrisentstehung während der Aufbereitung hinsichtlich des in der vorliegenden Studie standardisierten Spülprotokolls als mögliche Ursache für die Ergebnisse der Auswertung der Rasterelektronenmikroskopbilder zu sehen.

Weiterhin ist ein besseres Debridement durch das System *SafeSider* als durch die Feilen des Systems *Reciproc* hier belegbar. Die nur einseitig belegte Schneide erweist sich hier als Vorteil, da sie laut Herstellerangaben einen größeren Spanraum zur Beförderung des Debris aus dem Kanal hinaus darstellt.

6.2.4 Smear layer

Die Bestandteile des Smear layers, welcher bei der Wurzelkanalaufbereitung entsteht, werden als organischer und anorganischer Anteil klassifiziert. Der organische Teil wird gut von *NaOCl* aufgelöst, da diese Spüllösung ein hohes Oxidationspotential aufweist und somit organische Substanzen hervorragend denaturieren kann. Der anorganische Teil lässt sich hingegen ausschließlich von Säuren wie *EDTA* oder Zitronensäure entfernen. Eine Kombination dieser beiden Spülflüssigkeiten ermöglicht eine effektive Entfernung des Smear layers nach der Wurzelkanalaufbereitung (Torabinejad et al. 2002).

Die Reinigungseffizienz in Bezug auf das Kriterium Smear layer wurde auch von anderen Autoren vergleichend betrachtet. Hierbei konnten für die Systeme *ProTaper*, *Reciproc* und *WaveOne* keine signifikanten Unterschiede in den 3 betrachteten Wurzelkanalabschnitten ermittelt werden (Bürklein et al. 2012).

Die vorliegenden Ergebnisse differierten jedoch von dieser Auswertung, da der an den Kanalwänden verbliebene Smear layer nach chemomechanischer Aufbereitung in allen 3 Wurzelkanalabschnitten (apikal, medial und koronal) für die Systeme *ProTaper* und *WaveOne* am geringsten war. Somit besitzen sie eine verbesserte Reinigungsfähigkeit und sind den Systemen *Reciproc* und *SafeSider* in diesem Punkt überlegen.

Das höhere Volumen an Spülflüssigkeit durch die vermehrte Anzahl an Zwischenspülungen bei der Bearbeitung der Kanäle mit dem *ProTaper*-System ist als beeinflussender Faktor für dieses Ergebnis zu werten. Jedoch wurde als Zwischenspülung nur *NaOCl* verwendet und folglich nur der organische Anteil des *Smear layer* verstärkt gelöst und abtransportiert.

Das sehr gute Reinigungsergebnis für das System *WaveOne* in allen 3 Kanalbereichen im Vergleich mit den anderen getesteten *Single-file*-Systemen ist als wichtigste Feststellung der Auswertung der Rasterelektronenmikroskopbilder hinsichtlich des Smear layers zu werten. Vergleichbare Studien verweisen auf äquivalente Ergebnisse (Paqué 2005).

6.2.5 Spülprotokoll

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde ein klinisch relevantes Spülprotokoll eingesetzt, wie es in der endodontischen Behandlung allgemein Anwendung findet (Rajasingham et al. 2010). Der Einsatz von *NaOCl* ist essentiell für das Debridement und die Desinfektion des Wurzelkanalsystems. Daher wurde nach jeder Feilengröße eine Spülung mit *NaOCl* vorgenommen, um Dentinspäne und Debris effektiv aus dem Wurzelkanal entfernen zu können und ein Verbolzen des Kanals sowie eine daraus resultierende Verkürzung der Arbeitslänge zu vermeiden.

Die abschließende Spülsequenz wurde ebenfalls basierend auf wissenschaftlichen Ergebnissen durchgeführt, um eine effektive Entfernung des Smear layers zu erzielen (Crumpton et al. 2005).

Die Abschlussspülung mit 3 ml *EDTA*, 3 ml *NaOCl* und 3 ml *H₂O* in gleicher Reihenfolge war für jeden beurteilten Wurzelkanal innerhalb der 4 Systeme gleich und sollte sicherstellen, dass eventuelle Unterschiede hinsichtlich des Spülprotokolls, etwa aufgrund unterschiedlicher Spülvolumina, die Ergebnisse nicht beeinflussen konnten. Daher muss die Ursache für unterschiedlich hohe Smear layer-Reste in den Wurzelkanäle im Bereich des mechanischen Aufbereitungssegments liegen.

6.2.6 Kanalwandbeschaffenheit

Die Kanalwandbeschaffenheit beschreibt die Veränderung der Oberflächenstruktur der Wurzelkanalwand nach der Aufbereitung und bewertet die Bearbeitung der Oberfläche durch die einzelnen Instrumente.

Es zeigte sich im apikalen Wurzelkanalbereich eine bessere Bearbeitungsqualität der Dentinfläche durch die reziproken bzw. oszillierenden Aufbereitungssysteme (*Reciproc*, *WaveOne* und *SafeSider*), verglichen mit den Ergebnissen für das vollrotierende *ProTaper*-System. Dabei scheint nach dieser Untersuchung die Antriebsart (vollrotierend, oszillierend oder reziprok) nicht der entscheidende Faktor für die differierenden Ergebnisse hinsichtlich der postoperativen Wurzelkanaloberfläche zu sein. Am Beispiel des *ProTaper*-Systems konnte gezeigt werden, dass die Kanaloberflächen instrumentierter Wurzelkanäle mit unterschiedlichen Krümmungsradien keine signifikanten Unterschiede in ihrer

Oberflächenstruktur aufwiesen, wobei sowohl der vollrotierende als auch reziproke Antrieb zur maschinellen Aufbereitung genutzt wurden (You et al. 2011).

Allerdings verhindert der reziproke Antrieb durch seine auf einen 120°-Radius beschränkte effektive Winkelbewegung das Festsetzen der Feilen im Wurzelkanal besser als der vollrotierende Antrieb. Dadurch werden entsprechende Aberrationen der Kanalwand verhindert.

Dies könnte darin begründet liegen, dass der reziproke Bewegungsmodus einen permanenten Wechsel der Bewegungsrichtung vollzieht, wodurch theoretisch eine regelmäßige Korrektur der Position der Instrumentenspitze im Wurzelkanal gegeben ist. Diese Positionskorrektur durch Umkehr der Drehrichtung ist bei vollrotierenden Systemen erst nach Erreichen der Drehmomentgrenze möglich, wenn der Motor über einen automatischen Rücklauf verfügt und ein Lösen des im Kanal festklemmenden Instrumentes erlaubt. Auch muss bedacht werden, dass vollrotierende Systeme durch die signifikant höhere Zahl an Umdrehungen, die sie im Laufe der Aufbereitung bis zur Arbeitslänge vollziehen, deutlich mehr Gefahr laufen, einen gekrümmten Wurzelkanal zu begradigen. Hier kommt primär die Feilengeometrie, das Schneidendesign sowie die Konizität des Instrumentes zum Tragen.

Daher ist nach der vorliegenden Untersuchung die verkürzte Arbeitssequenz der *Single-file*-Systeme und damit der geringere Berührungszeitraum der Feilen mit der Wurzelkanalwand entscheidend für die homogenen Kanaloberflächen. Weiterhin minimiert wiederum die einseitig entschärfte Schneide der *SafeSider*-Instrumente die Berührungsfläche der Feile während der Oszillationszyklen mit der Wurzelkanalwand und verhindert so ebenfalls ein Festsetzen dieser Feilen im Wurzelkanal, wodurch tiefe Bearbeitungsspuren vermieden werden.

Im medialen wie auch koronalen Wurzelkanaldrittel entstand durch alle 4 Systeme nur eine geringe Veränderung der Oberflächenstruktur der Kanäle. Allerdings konnte vermehrt eine nur geringfügig veränderte Kanalwand im apikalen Kanaldrittel für jene Zähne belegt werden, welche durch die *Reciproc*- oder *SafeSider*-Feilen aufbereitet wurden. Daher ist hier bezüglich der Oberflächenbearbeitung der S-förmige Feilenquerschnitt des *Reciproc*-Systems eine bessere Bearbeitung der Wurzelkanalwand unter reziprokem Antriebsmodus möglich, als es dies unter Anwendung von Feilen mit konventionellem dreieckigem Querschnitt (*WaveOne*) ist.

Somit zeigten die Systeme *SafeSider* und *Reciproc* die beste Aufbereitungsqualität in Bezug auf die Veränderung der Wurzelkanalwand.

6.3 Abschlussbewertung

Das maschinelle Aufbereitungssystem *ProTaper* mit vollrotierendem Antrieb, die Systeme *Reciproc* und *WaveOne* mit reziprokem Antrieb und das System *SafeSider* wurden hinsichtlich der Qualität der durch sie erfolgten Aufbereitung miteinander verglichen, sowie der Einfluss der Antriebsart darauf analysiert wurde.

Die Anwendung der Feilen des Systems *WaveOne* war dem vollrotierenden *ProTaper*-System in vielen Aspekten gleichwertig, zum Teil sogar überlegen. Auch die Instrumente des Systems *Reciproc* zeigten eine überzeugende Reinigungsleistung, jedoch liegen noch gewisse Defizite in Bezug auf die Entfernung des Smear layer und das Debridement der gekrümmten Wurzelkanäle durch diese Feilen vor.

Einzig die *SafeSider*-Instrumente zeigten sowohl hinsichtlich der Aufbereitungsdauer als auch der Reinigungsqualität schlechtere Ergebnisse.

Arbeitshypothese #1:

Anhand eines Single-file Systems kann bei gleichen Aufbereitungsmodalitäten unter Berücksichtigung bestimmter Parameter eine zu permanent rotierenden Systemen gleichwertige Aufbereitung der gekrümmten Wurzelkanäle erfolgen.

Die Arbeitshypothese #1 wird angenommen.

Weiterhin hängt die Qualität der Wurzelkanalaufbereitung nicht von der Antriebsart ab. Die Ergebnisse des *SafeSider*-Systems sind vielmehr auf das Design der Schneide zurückzuführen, wobei ebenfalls dargestellt werden konnte, dass die als sicher beschriebene *SafeSider*-Feile bezüglich der Veränderung des Krümmungswinkels das schlechteste Ergebnis erbrachte.

Arbeitshypothese #2:

Die Aufbereitungsqualität ist unabhängig von der Antriebsweise der maschinellen Aufbereitungsinstrumente (vollrotierend oder reziprok/ oszillierend).

Die Arbeitshypothese #2 wird angenommen.

Folglich ist die Verwendung des *Single-file*-Systems *WaveOne* als adäquate Alternative zur Aufbereitung von gekrümmten Wurzelkanälen durch konventionelle Mehrfeilensysteme anzusehen. Für qualitativ hochwertige Ergebnisse im klinischen Einsatz des Systems *Reciproc* bedarf es noch der Verbesserungen bezüglich der hier bewerteten Kriterien.

7 Zusammenfassung

7.1 Einleitung

Jede endodontische Behandlung zielt auf einen Erhalt des erkrankten Zahnes ab. Um dies dauerhaft zu ermöglichen, sind der betroffene Zahn und dessen Wurzelkanäle sowohl chemisch als auch mechanisch zu reinigen. Hierbei kann die Reinigung durch manuell bewegte oder maschinell angetriebene Endodontieinstrumente erfolgen.

Die vorliegende Studie vergleicht die vier maschinellen Aufbereitungssysteme *ProTaper*, *WaveOne*, *Reciproc* und *SafeSider* in Bezug auf ihre Reinigungsqualität mit gesonderter Betrachtung der unterschiedlichen maschinellen Bewegungsmuster (vollrotierend, reziprok sowie oszillierend) und dem Aufbau der verschiedenen Feilensysteme (Single-file oder vollrotierende Systeme) wie auch der Aufbereitungsdauer und der Kanalanatomie.

7.2 Material und Methode

Zur Durchführung der Versuche wurden 60 Seitenzähne mit gekrümmten Wurzelkanälen anhand der 4 zu vergleichenden Aufbereitungssysteme mechanisch gereinigt. Die chemische Reinigung erfolgte durch Spülungen mit H_2O_2 , *EDTA* und *NaOCl*. Die Zähne wurden vor und nach der Aufbereitung geröntgt, um Abweichungen der Kanalanatomie darzustellen und bewerten zu können. Nach erfolgter Aufbereitung wurden die Zahnwurzeln entlang der Längsachse der Kanalkrümmung in 2 Hälften zerteilt und im Rasterelektronenmikroskop bezüglich des Smear layers, dem Debris und der Kanalwandbeschaffenheit mittels Score-Systemen beurteilt.

7.3 Ergebnisse

Die Auswertung der unterschiedlichen Parameter zeigte signifikante Unterschiede der 4 Aufbereitungssysteme bei der Betrachtung der Aufbereitungsdauer, der Differenz der Krümmungswinkel der Kanäle vor und nach der Aufbereitung, dem Smear layer und dem Debris ($p < 0,05$).

7.4 Schlussfolgerung

Das Single-file-System *WaveOne* ist nach Auswertung der statistischen Tests der Versuchsergebnisse dem vollrotierenden *ProTaper*-System in vielen Aspekten gleichwertig und zum Teil sogar überlegen. Das *Reciproc*-System zeigte ebenfalls

gute Ergebnisse, nur das *SafeSider*-System konnte keine überzeugende Reinigungsleistung hervorbringen.

Daher ist das reziproke Single-file System *WaveOne* zur Aufbereitung gekrümmter Wurzelkanäle als akzeptables Gegenmodell zur konventionellen maschinellen Aufbereitung durch vollrotierende Mehrfeilensysteme anzusehen.

8 Summary

8.1 Introduction

Endodontic treatment focuses on the preservation of the infected tooth. Ensuring this permanently, the tooth has to be cleaned by chemical and mechanical means. The mechanical treatment can be done by hand or mechanical driven endodontic instruments.

To compare the four mechanical driven endodontic preparation systems *ProTaper*, *WaveOne*, *Reciproc* and *SafeSider*, referring to the cleaning quality with special regards on the different types of motion pattern (rotating, reciprocating, and oscillating) and the assembling of the various systems (single-file or multiple-file system) as well as on the time needed to prepare the root canal, was the aim of this study.

8.2 Materials and Methods

Revising it, 60 teeth with curved root canals were cleaned by the 4 different types of instruments. Chemo-mechanical preparation was performed using flushes of distilled water, *EDTA*, and *NaOCl*. The teeth were x-rayed before and after the preparation to be able to show and compare variations of the root canal anatomy. Then the teeth were split alongside the longitudinal axis of the curvature and observed with scanning electron microscope referring to the smear layer, the debris and the condition of the root canal wall by different scoring systems.

8.3 Results

The analysis of the different parameters showed significant disparities of the 4 systems, comparing the time needed to prepare the root canal, the difference of the angle of curvature before and after treatment, the smear layer and the debris ($p < 0,05$).

8.4 Conclusion

WaveOne, a single-file reciprocating system, showed brilliant performance and worked out as well as the *ProTaper* rotating instruments, even better in some aspects. The *Reciproc* instruments appeared to be slightly inferior to *ProTaper* and *WaveOne*. The *SafeSider* instruments showed the least sufficient cleaning. Therefore, the *WaveOne* preparation system can be regarded as an acceptable option in preparing the curved root canal in reciprocating motion.

9 Anhang

9.1 Technische Daten

9.1.1 *ProTaper*

Antrieb: rotierend

Legierung: Nickel-Titan (Arbeitsteil)

Instrument:	S1	21 mm; 25 mm; 31 mm
	S2	21 mm; 25 mm; 31 mm
	F1 .07/#20	21 mm; 25 mm; 31 mm
	F2 .08/#25	21 mm; 25 mm; 31 mm
	F3 .09/#30	21 mm; 25 mm; 31 mm
	F4 .06/#40	21 mm; 25 mm; 31 mm
	F5 .05/#50	21 mm; 25 mm; 31 mm
	SX Taper von 3,5-29%	19 mm

Drehzahlbegrenzung: 150-350 U/min

9.1.2 *WaveOne*

Antrieb: reziprok

Legierung: Nickel-Titan (Arbeitsteil)

Instrument:	WaveOne Small (.06/#21)	21 mm;25 mm;31 mm
	WaveOne Primary (.08/#25)	21 mm;25 mm;31 mm
	WaveOne Large (.08/#40)	21 mm;25 mm;31 mm

Drehzahlbegrenzung: 150-350 U/min

9.1.3 *Reciproc*

Antrieb: reziprok

Legierung: Nickel-Titan (Arbeitsteil) > M-Wire

Instrument:	R50 (.05/#50)	21 mm;25 mm;31 mm
	R40 (.06/#40)	21 mm;25 mm;31 mm
	R25 (.08/#25)	21 mm;25 mm;31 mm

Drehzahlbegrenzung: 150-350 U/min

9.1.4 SafeSiders

Antrieb:	oszillierend	
Legierung:	Edelstahl	
Instrument:	.06/#25	21 mm;25 mm
	.08/#25	21 mm;25 mm
	.04/#30	21 mm;25 mm
Drehzahlbegrenzung:		250 U/min

9.1.5 C- Feilen

Legierung:	Edelstahl	
Antrieb:	manuell	
Instrument:	.04/#06	21 mm;25 mm;31 mm
	.04/#08	21 mm;25 mm;31 mm
	.04/#10	21 mm;25 mm;31 mm

9.1.6 Reamer

Legierung:	Edelstahl	
Antrieb:	manuell	
Instrument:	.04/#15	21 mm;25 mm;31 mm

9.1.7 VDW Silver Endo

Sirona Winkelstück 6:1	
Fußschalter	
Abmessung (B*H*T):	209 x 90 x 89mm
Gewicht:	1,0 kg
Drehmoment:	20-140 g/cm
Drehzahlbereich:	1500- 6000 U/min

9.1.8 Phenom FEI Rasterelektronenmikroskop

www.tabletop.em.com

Phenom Technical Specifications

Highest resolution:	30nm
Magnification (optical mode):	20x
Magnification (electron mode):	121-24000x (electron mode)
Digital zoom:	12x
Screen interface:	touch screen monitor
Accelerating voltage:	5 kV fixed
Sample size:	25mm (D) x 30mm (H)
Sample loading:	time 10s
Time to get an electron image:	30s
Signal detection:	backscattered electron detector
High brightness source:	CeB6
Source working hours:	1000
Sample observation mode:	Low Vacuum Mode
Data storage:	USB flash drive
Image format options:	JPEG, TIFF, BMP
Maximum Image Resolution:	2048 x 2048
Specimen stage:	18mm x 25mm
Motorised specimen stage:	Yes
Optical mode:	Yes
Navigation camera:	Yes
Body weight:	52 kg
Size:	286 mm (W) x 566 mm (D) x 495 mm (H)
EDX:	not available
Peltier stage:	not available
Additional attachments:	1 Charge reduction sample holder 2 Metallurgical sample holder 3 Microtool sample holder 4 Microelectronics inserts 5 X- view inserts

	Abmessungen	Bildgröße(Pixel) 40 µm	Bildgröße 40 µm	Bildgröße(Pixel) 64 µm	Bildgröße 64 µm
0	22*31 mm	550*775 Pixel	833 KB	484*344 Pixel	325 KB
1	24*40 mm	600*1000 Pixel	1,17 MB	625*375 Pixel	458 KB
2	31*41 mm	775*1025 Pixel	1,55 MB	641*484 Pixel	606 KB
3	27*54 mm	675*1350 Pixel	1,78 MB	844*422 Pixel	695 KB

9.1.9 Digora Optime

Pixelgröße (wählbar): 40µm (Super), 64µm (Hoch)
 Bit- Tiefe: 14 Bit-Graustufen
 Räumliche Auflösung: 12,5 lp/mm
 Verarbeitungszeit: 4,3-7,5 Sekunden
 UTP (RJ- 45) Ethernet erforderlich,
 Anschluss an PC muss gemäß
 IEC 60601-1 &/o. einer entsprechenden IEC-
 angeglichenen nationalen Norm erfolgen

DXR 50 Klassifizierung IEC 60601-1

- Gerät der Klasse 1
- Dauerbetrieb- IPXO (Gerät mit geschlossenem Gehäuse ohne Schutz gegen das Eindringen von Flüssigkeiten)

Abmessungen: 191 mm x 121 mm x 394 mm (H x B x T)
 Gewicht: 7 kg
 Betriebsspannung: 100- 240 V; 50/60 Hz
 Betriebsstrom: unter 1,3 A
 Betriebsumgebung: +10° bis +40°C; 30-90% relative Luftfeuchtigkeit,
 700-1060 hPa
 Betriebsoption: horizontal, auf einer stabilen
 Vibrationsfreien Unterlage
 Lager-/ Transportbedingungen: +10° bis +50°C; 0-90%
 relative Luftfeuchtigkeit,
 500-1080 hPa

9.2 Materialien

Blaues Winkelstück	KaVo GmbH, Biberach, Deutschland
Boxing-Wax	Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland
C-Feile Größe 6,8,10	VDW GmbH, München, Deutschland
Venus Composite	Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland
Destilliertes Wasser	Apotheke des UKGM, Marburg
Diamanttrennscheibe	Biflex, Artikelnr. 27100, Renfert, Deutschland
Digora Röntgensystem	Soredex, Schutterwald, Deutschland
EDTA 15%	Herstellung in der Apotheke des Universitäts- Klinikums Gießen und Marburg (UKGM) nach Prof. Kim
FEI Phenom	Phenom-World BV, Eindhoven, Niederlande
Guttapercha-Stifte	Pluradent AG und Co. KG, Offenbach, Deutschland
Leit-C-Plast	Agar Scientific Ltd., Stanstead, United Kingdom
NaOCl	Speiko, Dr. Speier GmbH, Münster, Deutschland
Papierspitzen ISO 25	Pluradent AG und Co. KG, Offenbach, Deutschland
Plexiglaskästchen	Pluradent AG und Co. KG, Offenbach, Deutschland
Reamer K Größe 15	VDW GmbH, München, Deutschland
Probenträger	Agar Scientific Ltd. Stanstead, United Kingdom
ProTaper	DENTSPLY Maillefer, Ballaigues, Schweiz
Rosenbohrer	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH und Co. KG, Lemgo, Deutschland
Rotes Winkelstück	KaVo GmbH, Biberach, Deutschland
SafeSiders	M+W Dental, Bidingen, Deutschland
Silasoft N	Detax Dental, Ettlingen, Deutschland
Thymollösung	Apotheke des UKGM, Marburg
Trepanationsbohrer	Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH und Co. KG, Lemgo, Deutschland
WaveOne	DENTSPLY Maillefer, Ballaigues, Schweiz

9.3 Abkürzungen

Abb.	Abbildungen
AL	Arbeitslänge
Bits	Binary digits
BMP	Bitmap (Windows Dateiformat)
°C	Celsius
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
g	Gramm
g/cm	Gramm pro Zentimeter
hPa	Hektopascal
ISO	International Organization of Standardization
JPEG	Joint Photographics Expert Group
KB	Kilobyte
kg	Kilogramm
kV	Kilovolt
MB	Megabyte
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
m/M	$n=m/M$ n entspricht der Stoffmenge; m = Masse; M = molare Masse
NaOCl	Natriumhypochlorit
NiTi	Nickel-Titan
OK	Oberkiefer
p	Signifikanzwert
pH	pondus hydrogenii
%	Prozent
r	Radius
REM	Rasterelektronenmikroskop
s	Sekunden
Tab.	Tabelle
UK	Unterkiefer
U/min	Umdrehungen pro Minute
UTP	unshielded twisted pair

VPN	virtual private network
W	Winkelhalbierende
μm	

10 Literaturverzeichnis

1. Baumgartner JC, Mader CL: A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. J Endod 1987 Apr; 13(4): 147-57
2. Baumgartner JC, Cuenin PR: Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. J Endod 1992 Dec; 18(12): 605-12
3. Bergmans L, Van Cleyenbreugel J, Weyers M, Lambrechts P: Mechanical root canal preparation with nickel-titanium rotary instruments: rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. Am J Dent 2001 Oct; 14(5): 324-33
4. Berutti E, Paolino DS, Chiandussi G, Alovisei M, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D: Root canal anatomy preservation of WaveOne reciprocating files with or without glide path. J Endod 2012 Jan; 38(1): 101-4
5. Berutti E, Chiandussi G, Paolino DS, Scotti N, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D: Effect of canal length and curvature on working length alteration with WaveOne reciprocating files. J Endod 2011 Dec; 37(12):1687-90
6. Berutti E, Chiandussi G, Paolino DS, Scotti N, Cantatore G, Castellucci A, Pasqualini D: Canal shaping with WaveOne Primary reciprocating files and ProTaper system: a comparative study. J Endod 2012 Apr;38(4): 505-9
7. Boleanos OR, Irving HS, Gonsky MR, Srinivasan R: A comparison of engine and air-driven instrumentation methods with hand instrumentation. J Endod 1988 Aug; 14(8): 392-6
8. Bonaccorso A, Cantatore G, Condorelli GG, Schäfer E, Tripi T: Shaping ability of four nickel-titanium rotary instruments in simulated s-shaped canals. J Endod 2009 Jun; 35(6): 883-6
9. Bürklein S, Hinschitza K, Dammaschke T, Schäfer E: Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. Int Endod J 2012 May; 45(5): 449-61
10. Bürklein S, Schäfer E: Apically extruded debris with reciprocating single-file and full-sequence rotary instrumentation systems. J Endod 2012 Jun; 38(6): 850-2
11. Calt S, Serper A: Time-dependent effects of EDTA on dentin structures. J Endod 2002 Jan; 28(1): 17-9
12. Camps JJ, Pertot WJ: Torsional stiffness properties of nickel-titanium K files. Int Endod J 1995 Sept; 28(5): 239-43

13. Camps JJ, Pertot WJ, Levallois B: Relationship between file size and stiffness of nickel-titanium instruments. *Endod Dent Traumatol* 1995 Dec; 11(6): 270-3
14. McComb D, Smith DC: A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *J Endod* 1975 July; 1(7): 238-42
15. Crumpton BJ, Goodell GG, Mc Clanahan SB: Effects on smear layer and debris removal with varying volume of 17% REDTA after rotary instrumentation. *J Endod* 2005 July; 31(7): 536-8
16. Dychdala GR: Chlorine and chlorine compounds. In: Block SS, ed. *Disinfection, sterilization and preservation*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1991: 131-51
17. Estrela C, Estrela CR, Barbin EL, Spano JC, Marcheson MA, Pecora JD: Mechanism of action of sodium hypochlorite. *Braz Dent J* 2002; 13(2): 113-7
18. Hilaly Eid GE, Wanees Amin SA: Changes in diameter, cross-sectional area and extent of canal-wall touching on using 3 instrumentation techniques in long-oval canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011 Nov; 112(5): 688-95
19. Fan B, Cheung GS, Fan M, Gutmann JL, Bian Z: C-shaped root canal system in mandibular second molars: Part 1- anatomical features. *J Endod* 2004 Dec; 30(12): 889-903
20. Gabel WP, Hoen W, Steinman HR, Pink FE, Dietz R: Effect of rotational speed on nickel-titanium file distortion. *J Endod* 1999 Nov; 25(11): 752-4
21. Gambarini G: Rationale for the use of low-torque endodontic motors in root canal instrumentation. *Endod Dent Traumatol* 2000; 16: 95-100
22. Gambarini G: Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments after clinical use with low- and high-torque endodontic motors. *J Endod* 2001 Dec; 27(12): 772-4
23. Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GT, Kawahani DA: Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endod* 2012 May; 38(5): 684-7
24. Garberiglio R, Becce C: Smear layer removal by root canal irrigants. A comparative scanning electron microscopic study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1994 Sep; 78(3): 359-367
25. Goldberg F, Abramovich A: Analysis of the effect of EDTAC on the dentinal walls of the root canal. *J Endod* 1977 Mar; 3(3): 101-5
26. Grande NM, Plotino G, Falanga A, Pomponi M, Somma F: Interaction between EDTA and sodium hypochlorite: a nuclear magnetic resonance analysis. *J Endod* 2006 May; 32(5): 460-4

27. Grande NM, Plotino G, Butti A, Messina F, Pameijer CH, Somma F: Cross-sectional analysis of root canals prepared with nickel- titanium rotary instruments and stainless steel reciprocating files. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2007 Jan; 103(1): 120-6
28. Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M: Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J* 2003 Jun; 36(6): 411-5
29. Guilford WL, Lemous JE, Eleazer PD: A comparison of torque required to fracture rotary files with tips bound in simulated curved canals. *J Endod* 2005 Jun; 31(6): 468-70
30. Hand RE, Smith ML, Harrison JW: Analysis of the effect of dilution on the necrotic tissue dissolution property of sodium hypochlorite. *J Endod* 1978 Feb; 4: 60-4
31. Hartmann MS, Barletta FB, Camargo Fontanella VR, Vanni JR: Canal transportation after root canal instrumentation: a comparative study with compute tomography. *J Endod* 2007 Aug; 33(8): 962-5
32. Heidemann D, Hülsmann M, Petschelt A, Raab HM, Schäfer E, Weiger R: Die maschinelle Wurzelkanalaufbereitung. Stellungnahme der DGZMK 2005, Version 1.0. *Dtsch Zahnärztl Z* 2005; 60 (8)
33. Hülsmann M, Schäfer E: Probleme in der Endodontie. Quintessenz Verlag 2007
34. Hülsmann M, Rummlein C, Schäfers F: Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation. *J Endod* 1997 May; 23(5): 301-6
35. Hülsmann M: Zur Geschichte der Wurzelkanal-aufbereitung. *Endodontie* 1996: (5) 97-112
36. Hülsmann M: Entwicklung einer Methode zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichend In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Quintessenz Verlag, Berlin 2000
37. Hülsmann M, Stryga F: Comparison of root canal preparation using different automatised devices and hand instrumentation. *J Endod* 1993 Mar; 19(3): 141-5
38. Hülsmann M, Peters OA, Dummer P: Mechanical preparations of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics* 2005 Mar; 10(1): 30-76

39. Jungmann CL, Uchin RA, Bucher JF: Effect of instrumentation on the shape of the root canal. *J Endod* 1975 Feb; 1(2): 66-9
40. Kim H, Kwak S, Cheung G, Ko D: Cyclic fatigue and torsional resistance of 2 new Ni-Ti-instruments used in reciprocating motion: Reciproc versus WaveOne. *J Endod* 2012 Apr; 38(4): 541-4
41. Kim HC, Yum J, Hur B, Cheung GS: Cyclic fatigue and fracture characteristics of ground and twisted nickel-titanium rotary files. *J Endod* 2010;36(1): 147-52
42. Kitchens GG, Liewehr FR, Moon PC: The effect of operational speed on the fracture of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2007 Jan; 33(1): 52-4
43. Madureira RG, Navarro LF, Liena MC, Costa M: Shaping ability of nickel-titanium rotary instruments in simulated s-shaped root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2010; 109: e136-e 144
44. Meyer W: Die Anatomie der Wurzelkanäle. *Dtsch Zahnärztl Z*; 14(Heft 17) 1959
45. Özer SY: Comparison of root canal transportation induced by three rotary systems with noncutting tips using computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011 Feb; 111(2): 244-50
46. Paqu  F, Musch U, Hülsmann M: Comparison of root canal preparation using RaCe and PT rotary instruments. *Int Endod J* 2005 Jan; 38(1): 8-16
47. Peters OA, Roehlike JO, Baumann MA: Effect of immersion in sodium hypochlorite on torque and fatigue resistance of nickel-titanium instruments. *J Endod* 2007 May; 33(5):589-93
48. Peters OA: Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod* 2004 Aug. 30(8): 559- 67
49. Petschelt A, Oberschachtsiek H: Über die Schmierschicht (smear layer) nach der Wurzelkanalaufbereitung (REM-Untersuchung). *Dtsch Zahnärztl. Z* 1985; 40: 845- 49
50. Pongione G, Gambarini G, Bossu M: Bending and torsional properties of GT rotary files: a comparative study (abstract). *Int Endod J* 2000; 33: 162
51. Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL: Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod* 1997 Feb. 23(2):77-85
52. Rajasingham R, Ng YL, Knowles JC, Gulabiavala K: The effect of sodium hypochlorite and ethylenediamine-tetraacetic acid irrigation, individually and in alteration, on tooth surface strain. *Int Endod J* 2010 Jan; 43(1): 31-40
53. Rhodes SC, Hülsmann M, McNeal SF, Beck P, Eleazer PD: Comparison of root canal preparation using reciprocating SafeSiders stainless steel and

- Vortex nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011 May; 111(5): 659-67
54. Sattapan B, Palamara JE, Messer HH: Torque during canal instrumentation using rotary nickel-titanium files. *J Endod* 2000 Mar; 26(3): 156-60
 55. Sen BH, Ertürk Ö, Piskin B: The effect of different concentrations of EDTA on instrumented root canal walls. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009 Oct; 108(4) 622-627
 56. Serper A, Calt S: The demineralizing effects of EDTA at different concentration and pH. *J Endod* 2002 Jul; 28(7): 501-2
 57. Schäfer E: Relationship between design features of endodontic instruments and their properties. Part 2. Instrumentation of curved canals. *J Endod* 1999 Jan; 25(1): 56-59
 58. Schäfer E, Tepel J: Formveränderung stark gekrümmter Wurzelkanäle nach standardisierter Aufbereitung. *Dtsch Zahnärztl Z* 1993; 48: 653-658
 59. Schäfer E: Metallurgie und Eigenschaften von Ni-Ti-Handinstrumenten. *Endodontie* 1999; 8: 213
 60. Schäfer E: Root canal instruments for manual use: A review. *Endod Dent Traumatol* 1997 Apr; 13(2): 51-64
 61. Schäfer E, Oitzinger M: Cutting efficiency of five different types of rotary nickel-titanium instruments. *J Endod* 2008 Feb; 34(2): 198-200
 62. Schäfer E, Lau R: Comparison of cutting efficiency and instrumentation of curved canals with nickel-titanium and stainless steel instruments. *J Endod* 1999 June 25(6): 427- 430
 63. Schäfer E, Dzepina A, Danesh G: Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003 Dec; 96(6): 757-763
 64. Schneider SW: A comparison of canal preparation in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1971 Aug; 32(2):271-5
 65. Soares JA, Roque de Carvalho MA, Cunha Santos SM, Mendonca RM, Ribero-Solorinho AP, Brito-Junior M, Magalhaes PP, Santos MH, de Macedo Farias L: Effectiveness of chemomechanical preparation with alternating use of sodium hypochlorite and EDTA in eliminating intracanal *Enterococcus faecalis* biofilm. *J Endod* 2010 May; 36(5): 894-8
 66. Test ST, Lampert MB, Ossana PJ, JG Thoene, Weiss SJ: Generation of nitrogen-chlorine oxidants by human phagocytes; *J Clinical Investigation* 1984; 74:1341-9

67. Testarelli L, Plotino G, Al-Sudani D, Vincenzi V, Giansiracusa A, Grande NM, Gambarini G: Bending properties of a new nickel-titanium alloy with a lower percent by weight of nickel. *J Endod* 2011 Sep; 37(9): 1293-5
68. Thompson SA: An overview of nickel-titanium alloy use in dentistry. *Int Endod J* 2000;33: 297-310
69. Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK: Clinical implications of the smear layer in endodontics: a review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* Dec 2002; 94(6): 658-666
70. Trepagnier CM, Madden RM, Lazzari EP: Quantative study of sodium hypochlorite as an in vitro endodontic irrigant. *J Endod* 1977 May; 3(5): 194-6
71. Vertucci FJ, Haddix JE, Britto LR: Pathways to the Pulp. Chapter 7; 9th edition; Cohen S and Hargraves KM (editor); St Louis, Missouri: CV Mosby 2006
72. Walia H, Brantley WA, Gerstein H: An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files. *J Endod* 1988 Jul; 14(7): 346-51
73. Wan J, Rasimick BJ, Musikant BL, Deutsch AS: Cutting efficiency of 3 different instrument designs used in reciprocation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2010 May; 109(5): e82-e85
74. Wan J, Brian J Rasimick, Barry L Musikant, Allan S Deutsch: A comparison of cyclic fatigue resistance in reciprocating and rotary nickel-titanium instruments. *Aust Endod J* 2001; 37: 122-127
75. Wang FE, Pickart SJ, Alperin HA: Mechanism of the TiNi martensic transformation and the crystal structures of TNi-2 and TiNi-3 phases. *Journal of applied physics* 1972; 43(1): 97-112
76. Weiger R, El Ayouti A, Löst C: Efficiency of hand and rotary instruments in shaping oval root canals. *J Endod* 2002 Aug; 28(8):580-3
77. Weine FS: The c-shaped mandibular second molar: Incidence and other considerations. The Member of the Arizona Endodontic Association. *J Endod* 1998 May; 24(5): 372-5
78. Weine FS, Kelly RF, Bray KE: Effect of preparation with endodontic handpieces on original canal shape. *J Endod* 1976 Oct; 2(10): 298-303
79. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS: A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions. Part 3. *J Endod* 1983 Apr; 9(4): 137-142
80. Yoshida T, Shibata T, Shinohara T, Gomyo S, Sekine I: Clinical evaluation of the efficiacy of EDTA solution as an endodontic irrigant. *J Endod* 1995 Dec; 21(12): 592-3

81. You SY, Kim HC, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Lee W: Shaping ability of reciprocating motion in curved root canals: A comparative study with microcomputed tomography. J Endod 2011 Sep; 37(9): 1296-300
82. Yum J, Cheung GS, Park JK, Hur B, Kim HC: Torsional strength and toughness of nickel-titanium rotary files. J Endod 2011 Mar; 37(3): 382-6
83. Zehnder M: Root canal irrigants. J Endod 2006 May; 32(5):389-98
84. Zelada G, Varela P, Martin B, Bahillo JG, Magan F, Ahn S: The effect of rotational speed and the curvature of root canals on the breakage of rotary endodontic instruments. J Endod 2002 July; 28(7):540-2
85. Zou L, Shen Y, Li W, Haapasalo: Penetration of sodium hypochlorite into dentin. J Endod 2010 May; 36(5): 793-6

11 **Tabellarischer Lebenslauf**

Persönliche Daten

Name	Anna Elisabeth Dahlhoff
Geburtsdatum	19.03.1986
Geburtsort	Münster
Eltern	Heinrich Gerhard Dahlhoff, Landwirt Kordula Elisabeth Dahlhoff, Lehrerin
Geschwister	Ruth Maria Dahlhoff, Zahnärztin
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch
Wohnort	Buntentorsteinweg 466 28201 Bremen

Ausbildung

1992-1996	Grundschule Rinkerode
1996-2005	Immanuel-Kant-Gymnasium Hiltrup
09/2005-12/2005	Praktikum Krankenpflege im St. Josefs-Stift, Sendenhorst
04/2006-06/2011	Studium der Zahnmedizin an der Philipps-Universität Marburg
14.06.2011	Zahnärztliche Prüfung (Staatsexamen)
20.07.2011	Erhalt der Zahnärztlichen Approbation
01/2012-12/2012	Assistenz Zahnärztin in der Gemeinschaftspraxis Dr. N. Petrasevic & Dr. Th. Petrasevic-Einhaus, Ennigerloh
Seit 01/2013	Weiterbildungsassistentin der Oralchirurgie in der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgischen Gemeinschafts- praxis E.J. Schulz, Dr. Dr. H.U. Hoffmann und Partner in Bremen

12 Verzeichnis meiner akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer waren folgende Damen und Herren in Marburg:

Arweiler, Aumüller, Feuser, Flores-de-Jacoby, Frankenberger, Gente, Glorius,
Graz, Jablonski-Momeni, Korbmacher-Steiner, Lill, Löffler, Lotzmann, Mandrek,
Mengel, Mittag, Mutters, Neff, Neumüller, Pancherz, Pieper, Ramaswamy, Richter,
Roggendorf, Sonntag, Steininger

13 Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Roland Frankenberger, Direktor der Abteilung für Zahnerhaltungskunde an der Philipps-Universität Marburg, für die Überlassung des Themas

„Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zur Aufbereitungsqualität von Wurzelkanälen nach Instrumentierung mit reziproken und vollrotierenden Wurzelkanalinstrumenten“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Oberarzt Dr. Matthias Roggendorf für unermüdliches Engagement und seine hervorragende Betreuung. Seine wertvollen Ratschläge trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Meinen Eltern danke ich für ihre Unterstützung und Motivation während der gesamten Arbeitsphase.

14 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit den Titel

„Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zur Aufbereitungsqualität von Wurzelkanälen mit reziproken und vollrotierenden Wurzelkanalinstrumenten“ in der Klinik für Zahn-, Mund und Kieferheilkunde unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Dr. A. Neff mit Unterstützung durch Herrn Prof. Dr. R. Frankenberger ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen Medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Vorliegende Arbeit wurde zur Publikation im Journal of Endodontics eingereicht.

Ort, Datum, Unterschrift